

# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Steuerungskonzept für Mehrphasenpumpen im Parallelbetrieb**

Autor:

**Herr Ing. Horst Weißenbrunner**

Studiengang:

**Informationstechnik**

Seminargruppe:

**KI08wStA**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Rolf Hiersemann**

Zweitprüfer:

**Dipl.-Ing. (FH) Martin Langlechner**

Einreichung:

**Mittweida, 31.08.2012**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2012**



## **Bibliografische Beschreibung:**

Weißenbrunner, Horst:

Steuerungskonzept für Mehrphasenpumpen im Parallelbetrieb –2012. – VII, 68, II S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2012

## **Referat:**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Erstellung eines Steuerungskonzepts für Mehrphasenpumpen im Parallelbetrieb. Zunächst erfolgt eine Auswertung der Kennlinien und an Hand der Ergebnisse werden Konzepte für die Steuerung ermittelt. Diese Konzepte werden detailliert ausgearbeitet und bewertet.



# Inhalt

<b>Inhalt</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>0 Übersicht</b>	<b>1</b>
0.1 Motivation	1
0.2 Zielsetzung	2
0.3 Kapitelübersicht	2
<b>1 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>4</b>
1.1 Mehrphasenpumpe	4
1.1.1 Einsatzgebiet	4
1.1.2 Aufbau und Funktionsweise	6
<b>2 Ausgangssituation</b>	<b>9</b>
2.1 Aufbau eines MPP-Skids	9
2.2 Anlagensteuerung	11
2.3 Steuerungsaufbau	13
2.4 Regelung einer MPP	14
<b>3 Kennlinien</b>	<b>19</b>
<b>4 Steuerungskonzepte</b>	<b>21</b>
4.1 Konzept 1 – Regelung einer Pumpe	22
4.1.1 Zuschaltung von Pumpen gleicher Leistung	22
4.1.2 Drehzahlensenkung / Abschaltung einzelner Pumpen	24
4.1.3 Zuschaltung von Pumpen unterschiedlicher Leistung	25
4.1.4 Fazit Konzept 1	27
4.1.5 Programmiermodell	28
4.2 Konzept 2 - Regelung aller Pumpen (identischer Sollwert)	31
4.2.1 Ausgangssituation:	31
4.2.2 Abschaltung von Pumpen	32

4.2.3	Anpassung der Regelparameter .....	35
4.2.4	Simulation des Regelkreises .....	43
4.2.5	Programmiermodell .....	53
4.2.6	Fazit Konzept 2: .....	54
4.3	<i>Konzept 3 – Energieoptimierte Regelung</i> .....	55
4.3.1	Frequenzumrichter: .....	55
4.3.2	Motor: .....	56
4.3.3	Mehrphasenpumpe .....	57
4.3.4	Fazit .....	58
<b>5</b>	<b>Umsetzungsmöglichkeiten der Konzepte</b> .....	<b>59</b>
5.1	<i>Steuerungsauswahl</i> .....	59
5.1.1	Version 1 – eine CPU je Pumpe (S7-300) .....	60
5.1.2	Version 2 – eine CPU je Pumpenverbund (S7-300) .....	61
5.1.3	Version 3 - eine CPU je Pumpenverbund (S7-400) .....	63
5.1.4	Kostenvergleich .....	64
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Ausblick</b> .....	<b>65</b>
<b>Literatur</b>	.....	<b>67</b>
<b>Anlagen</b>	.....	<b>69</b>
<b>Anlage, Komponentenliste SPS</b>	.....	<b>A-1</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>		

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Konventionelle Erdölförderung [LePu2012] .....	4
Abbildung 1-2: Mehrphasenpumpensystem [LePu2011] .....	5
Abbildung 1-3: Aufbau einer MPP (L4HG) der Fa. Leistritz [LePu2010] .....	6
Abbildung 1-4: Modell L4 Multiphasenpumpe der Fa. Leistritz [LePu2011] .....	7
Abbildung 2-1: R&I-Schema einer MPP-Anlage [LePu2010] .....	9
Abbildung 2-2: Schrittkette der MPP-Anlage .....	12
Abbildung 2-3: Steuerungsaufbau [SiSp2012] .....	13
Abbildung 2-4: Blockschaltbild Siemens FB41 PID-Regler [Siem2012] .....	17
Abbildung 3-5: Pumpenkennlinie Leistung/Drehzahl [LeiP2012] .....	19
Abbildung 3-6: Pumpenkennlinie Durchfluss/Drehzahl [LeiP2012] .....	20
Abbildung 4-1: Konzept 1 Zuschaltung mit 50% Leistung .....	22
Abbildung 4-2: Konzept 1 Zuschaltung mit 100% Leistung .....	23
Abbildung 4-3: Konzept 1 Drehzahlsenkung um 50% Leistung .....	24
Abbildung 4-4: Konzept 1 Zuschaltung um 200% Leistung (unterschiedliche Pumpen). ..	25
Abbildung 4-5: Konzept 1 Zuschaltung um 100% Leistung (unterschiedliche Pumpen). ..	26
Abbildung 4-6: Konzept 1 Zuschaltung um 25% Leistung (unterschiedliche Pumpen)... ..	26
Abbildung 4-7: Konzept 1 Ablaufdiagramm .....	30
Abbildung 4-8: Konzept 2 Ermittlung des Abschaltpunktes .....	32
Abbildung 4-9: Einheitssprung .....	35
Abbildung 4-10: Blockschaltbild P-Regler .....	36

Abbildung 4-11: Sprungantwort P-Regler .....	36
Abbildung 4-12: Blockschaltbild P-Regler mit 2 Pumpen.....	37
Abbildung 4-13: Blockschaltbild I-Regler .....	39
Abbildung 4-14: Sprungantwort I-Regler.....	39
Abbildung 4-15: Blockschaltbild I-Regler mit 2 Pumpen .....	40
Abbildung 4-16: Sprungantwort I-Regler mit 2 Pumpen .....	40
Abbildung 4-17: Blockschaltbild PID-Regler .....	42
Abbildung 4-18: Regelkreis mit PID-Regler .....	43
Abbildung 4-19: PID Diagramm TIA-Portal eine Pumpe .....	45
Abbildung 4-20: Diagramm 2 Pumpen mit Regleranpassung .....	46
Abbildung 4-21: Diagramm 5 Pumpen mit Regleranpassung.....	46
Abbildung 4-22: Diagramm 5 Pumpen ohne Regleranpassung.....	47
Abbildung 4-23: Zulauf Behälter Testkonfiguration 2 .....	48
Abbildung 4-24: Diagramm eine Pumpe Testkonfiguration 2 .....	48
Abbildung 4-25: Diagramm 3 Pumpen Testkonfiguration 2 .....	49
Abbildung 4-26: Diagramm 5 Pumpen Testkonfiguration 2 .....	49
Abbildung 4-27: Diagramm eine Pumpe Testkonfiguration 3 .....	50
Abbildung 4-28: Diagramm 4 Pumpen Testkonfiguration 3 .....	51
Abbildung 4-29: Diagramm 5 Pumpen Testkonfiguration 3 .....	51
Abbildung 4-30: Diagramm 5 Pumpen ohne Regleranpassung.....	52
Abbildung 4-31: Erweiterung Ablaufdiagramm für Konzept 2 .....	53
Abbildung 4-32: Kennlinien Motor 315kW [LeiP2012 .....	56
Abbildung 4-33: Wirkungsgrad-Kennlinien MPP (L4HG 150 – 030) [LeiP2012].....	57



Abbildung 4-34: Konzept 3 Drehzahlsenkung um 33% Leistung .....	58
Abbildung 5-1: Steuerungsaufbau mit Einzelsystemen [SiSp2012] .....	60
Abbildung 5-2: Steuerungsaufbau S7-300 mit ET200M [SiSp2012] .....	61
Abbildung 5-3: Steuerungsaufbau S7-400 mit ET200M [SiSp2012] .....	63

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Konzept 1 Ausgangssituation Programmiermodell .....	28
Tabelle 4-2: Konzept 1 Zuschaltmatrix .....	30
Tabelle 4-3: Konzept 2 Ausgangssituation .....	31
Tabelle 4-4: Konzept 2 Abschaltpunkte identischer Pumpen .....	33
Tabelle 4-5: Konzept 2 Abschaltpunkte unterschiedlicher Pumpen.....	34
Tabelle 4-6: Konzept 2 Abschaltpunkte unterschiedlicher Pumpen - optimiert.....	34
Tabelle 4-7: Berechnung des P-Anteils für identische Pumpen.....	38
Tabelle 4-8: Berechnung des P-Anteils für unterschiedliche Pumpen.....	38
Tabelle 4-9: Berechnung des I-Anteils für identische Pumpen .....	41
Tabelle 4-10: Berechnung des I-Anteils für unterschiedliche Pumpen .....	41
Tabelle 4-11: Reglerparameter für den Siemens-Regler CONT_C .....	42
Tabelle 5-1: Kostenaufstellung .....	64

# Abkürzungsverzeichnis

<b>cSt</b>	centi Stokes, Einheit für die kinematische Viskosität ( $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ )
<b>ET200</b>	Dezentrale Peripherie mit Anbindungsmöglichkeiten über PROFIBUS und PROFINET
<b>Flare</b>	Fackel – zu Verbrennung von überschüssigem Erdgas in der Erdölindustrie
<b>GVF</b>	Gas volume fraction – Gasvolumenanteil im Medium
<b>HMI</b>	Human Maschine Interface
<b>Lube Oil</b>	Schmieröl
<b>MCC</b>	Motor Control Center
<b>MPP</b>	Mehrphasenpumpe, Spezialanwendung einer Schraubenspindelpumpe
<b>Off-Shore</b>	vor der Küste
<b>On-Shore</b>	An Land
<b>PID-Regler</b>	Proportional–integral–derivative Regler
<b>PROFIBUS</b>	Process Field Bus – Standard für Feldbuskommunikation der Automatisierungstechnik
<b>PROFINET</b>	Industrial Ethernet Standard von Profibus & Profinet International für Automatisierungstechnik
<b>R&amp;I</b>	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
<b>Remote I/O</b>	Dezentrale Peripherie
<b>S7-300</b>	Modulare Steuerung der Fa. Siemens – Kompaktsteuerung
<b>S7-400</b>	Modulare Steuerung der Fa. Siemens – Leistungsstarkes Steuerungssystem
<b>SCADA</b>	Supervisory Control and Data Acquisition
<b>Seal Oil</b>	Dichtöl
<b>Skid</b>	Rahmen für den Aufbau des Pumpensystems
<b>SIMATIC S7</b>	Steuerungsfamilie der Firma Siemens
<b>SPS</b>	Speicherprogrammierbare Steuerung
<b>TIA-Portal</b>	Totally Integrated Automation Portal, Programmierumgebung für Steuerungen (SPS, Visualisierung, etc)



# 0 Übersicht

## 0.1 Motivation

Der steigende Bedarf an Erdöl und das Verbot, überschüssiges Erdgas bei der Erdölförderung zu verbrennen, macht es nötig, die Kapazität im Erdöl/Erdgas Transport zu erhöhen. Bei Verwendung von normalen Pumpen kann über die Pipeline nur flüssiges Medium transportiert werden, im Gegensatz dazu ermöglicht eine Mehrphasenpumpe den Transport von Gas-Flüssigkeiten-Gemischen. Bisher wurden hierfür nur zwei getrennte Pumpen mit je einer eigenen Steuerung eingesetzt. So konnten Servicearbeiten an einer Pumpe durchgeführt werden und bei Abschaltung durch ein defektes Bauteil der Pumpe oder der elektrischen Komponenten wurde die zweite Pumpe gestartet. Die Umschaltung wurde nicht automatisch durchgeführt, es musste die Pumpe von Hand gestartet werden.

Einen neuen Lösungsansatz bietet die Parallelschaltung von mehreren Mehrphasenpumpen. Parallelgeschaltete kleine Pumpen haben den Vorteil, dass nur eine Pumpe als Standby benötigt wird. Bei zunehmender Förderkapazität ist eine einfache Erweiterung um eine oder mehrere Pumpen möglich, ebenso kann der Pumpenverbund auf mehrere andere Fördereinheiten aufgetrennt werden.

Ein konkreter Anwendungsfall war Ende 2011 ein Projekt in Surinam. Für das Ölfeld wurden 2 Pumpen geliefert, im ersten Schritt werden die Pumpen als Master und Standby-Pumpe betrieben. Im zweiten Schritt werden beide Pumpen gemeinsam betrieben – abhängig von dem zur Verfügung stehenden Fördervolumen an Erdöl. Geplant wurde für diesen Fall eine manuelle Zuschaltung einer zweiten Pumpe, die Drehzahl sollte per Hand vorgegeben werden.

Der Projektumfang bestand aus:

- 2 Stück Mehrphasenpumpe
- je Pumpe ein Steuerschrank mit einer Siemens SPS und Bedienpanel
- ein Visualisierungs-PC für beide Pumpen

Nach erster Abschätzung des möglichen Fördervolumens werden im Endausbau 3 Pumpen benötigt. Daher wurde zur Erweiterung des Ölfeldes zusätzlich noch ein zweites identisches Pumpenpärchen angeboten. Ist das Ölvorkommen erschöpft, soll jede Pumpe einzeln einsetzbar sein.

Aus diesem Grund ist es notwendig, mögliche Steuerungskonzepte für diese Anwendungsfälle zu untersuchen. Bei Stationen mit MPPs als Pipeline-Booster oder auch bei Fördereinrichtungen ist keine Operator-Mannschaft vor Ort. Die Anlagen laufen ohne permanente Beobachtung durch einen Operator. Ein übergeordnetes Leitsystem wird teilweise mit einer Beobachtungsfunktion und mit einer Eingabemöglichkeit für den Sollwert der Regelung sowie Ein/Ausschaltfunktion ausgestattet. Änderungen an Alarm-, Abschalt- oder sonstiger Anlagenparameter muss der Operator vor Ort am Bedienpanel der Anlage durchführen.

## 0.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Rahmen der Aufgabenstellung mit der Erstellung eines Regelkonzeptes für parallelgeschaltete Mehrphasenpumpen. Es werden die verschiedenen Ansätze detailliert ausgearbeitet und deren Vor- und Nachteile ermittelt.

## 0.3 Kapitelübersicht

Die Diplomarbeit besteht aus sechs Kapiteln.

Im **Kapitel 1** soll das Einsatzgebiet und die Funktion einer Mehrphasenpumpe grundlegend erklärt werden.

Das **Kapitel 2** bildet den aktuellen Ausführungstand (Ausgangssituation) der Steuerung ab. Es wird auf die Messtechnik (R&I, Steuerungsanbindung usw.), zusätzliche benötigte Aggregate (Öl-System etc.), Steuerungsablauf und die verwendete Hardware eingegangen.

Anhand von bestehenden Projekten werden die Kennlinien einer Mehrphasenpumpe im **Kapitel 3** analysiert. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Auswahl und weitergehend für die Umsetzung der möglichen Steuerungskonzepte.

Im **Kapitel 4** werden mögliche Steuerungskonzepte aufgelistet, analysiert und ein Steuerungsmodell erstellt. Der Hauptpunkt dieses Kapitels ist eine sinnvolle und praktikable Lösung der Zu-/Abschaltung und Drehzahlregelung der Pumpen zu ermitteln. Dadurch können die Vor- und Nachteile des jeweiligen Konzeptes objektiv betrachtet werden.

Die im vorhergehenden Kapitel ermittelten Steuerungskonzepte werden im **Kapitel 5** genauer beleuchtet. Ein Kriterium ist die Betrachtung der einzelnen Pumpen-Förderleistungen, in wieweit es sinnvoll ist, verschiedene Pumpengrößen in einem Verbund einzusetzen. An Hand des Konzeptes wird ein Steuerungsaufbau für ein System mit 5 Pumpen ermittelt. Kriterien für die Auswahl sind:

- Erweiterbarkeit
- Kosten
- Splitten in 5 Einzelpumpen

# 1 Grundlagen und Stand der Technik

## 1.1 Mehrphasenpumpe

### 1.1.1 Einsatzgebiet

Erdöl ist einer der wichtigsten fossilen Rohstoffe der Erde. Es wird für die Erzeugung von Treibstoffen (Benzin, Diesel usw.) sowie in der chemischen Industrie für die Herstellung verschiedenster Kunststoffe und anderer Chemieprodukten benötigt.

Die Förderung von Erdöl kann in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

- Übertrageabbau, z.B. „Athabasca-Erdölsande“ in Alberta, Kanada
- Untertageabbau
  - Abbau durch Bohrungen an Land
  - Off-Shore mit Bohrplattformen (schwimmend oder feststehend)

Im Untertageabbau von Erdöl wird immer auch Erdgas mitgefördert. Der Anteil an Erdgas wird meistens vom Erdöl separiert und in eigenen Pipelines zu den Tanklagern transportiert, teilweise wird das geförderte Erdgas auch zur Energieerzeugung verwendet und der Überschuss abgefackelt. Die folgende Abbildung zeigt das Schema einer konventionellen Förderung von Erdöl. Das Medium wird in Behälter gefördert, Gas und Wasser werden separiert und getrennt vom Erdöl transportiert. Mit dieser Methode werden zwei Pipelines benötigt und ein Anteil des Erdgases wird über eine Flare abgefackelt.

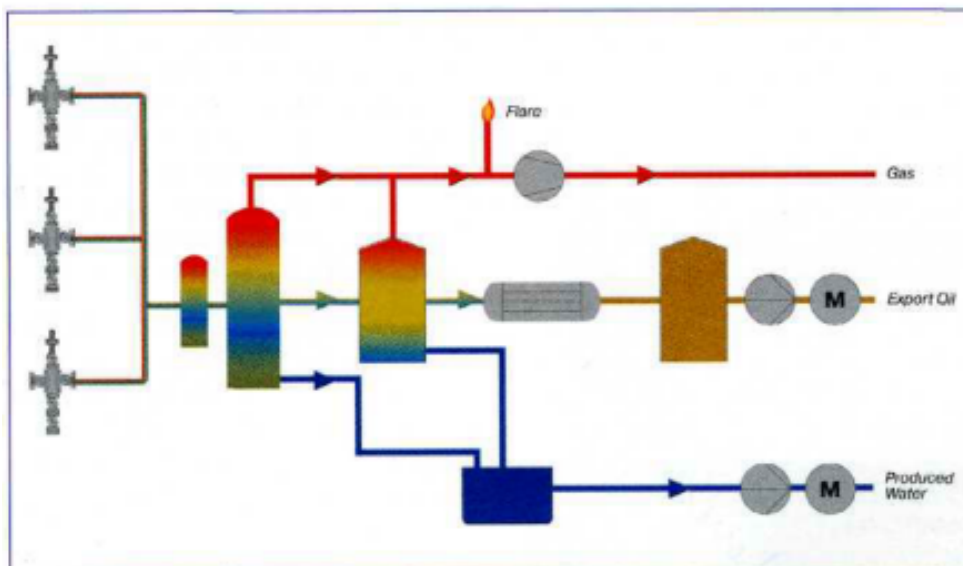


Abbildung 1-1: Konventionelle Erdölförderung [LePu2012]



Mehrphasenpumpen bieten die Möglichkeit, das Erdöl – Gas –Gemisch gemeinsam zu fördern. Diese Pumpen sind ideal um das Gemisch durch nur **eine** Pipeline zu befördern. Eine Separation von Gas und Wasser nach der Förderung wird nicht mehr benötigt und kann dadurch bei einer zentralen Tank-Farm erfolgen. Die Verbrennung von überflüssigem Erdgas kann bei diesem System entfallen.

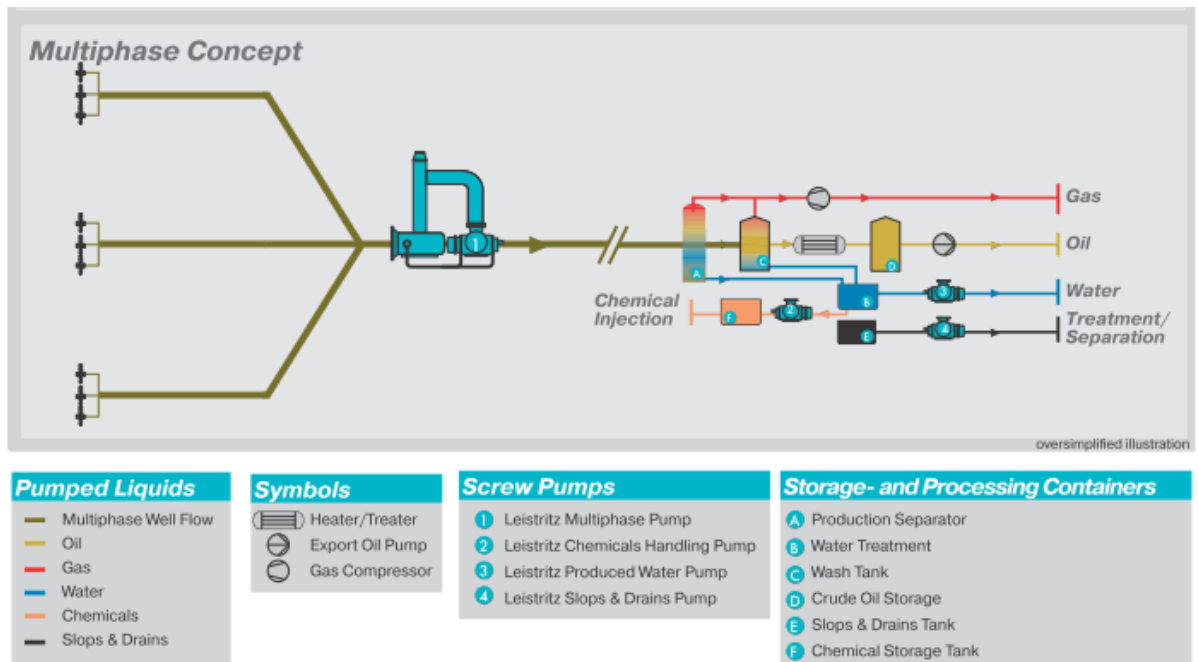


Abbildung 1-2: Mehrphasenpumpensystem [LePu2011]

### 1.1.2 Aufbau und Funktionsweise

Die Mehrphasenpumpe ist eine Schraubenspindelpumpe mit zwei Spindeln, einer Antriebs- und einer Laufspindel.

Es gibt zwei Möglichkeiten die Spindeln zu fertigen:

1. Aufgeschobene Spindelpakete auf der Welle

Vorteil ist der leichte und relativ günstige Austausch der Spindelpakete

2. Spindel aus einem Rohling gedreht

Der Nachteil ist eine teure Fertigung der Spindeln – Austausch nur einer gesamten Einheit Antriebs-/Laufspindel möglich. Der Vorteil ist eine homogene Durchbiegung der Spindel bei höherem Differenzdruck.

Der folgende Pumpenquerschnitt zeigt eine L4-Pumpe der Fa. Leistritz, L4 bezeichnet die Anzahl der Spindelpakete. Pumpeneinlauf ist auf den Außenseiten (blauer Bereich – niedriger Druck) und das Medium wird in die Mitte (roter Bereich – höherer Druck) zum Auslass gefördert.

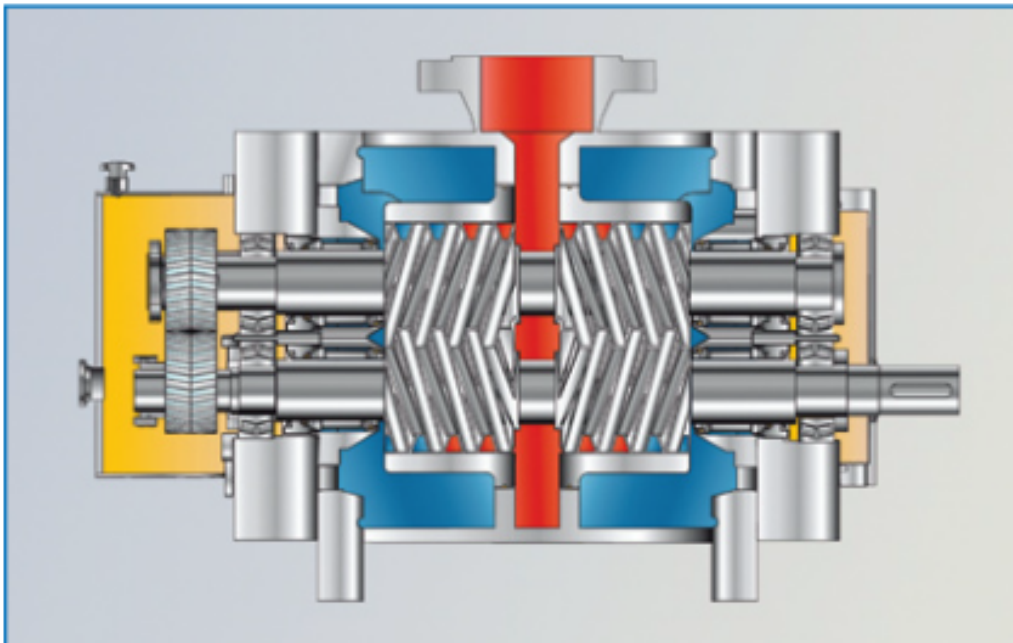
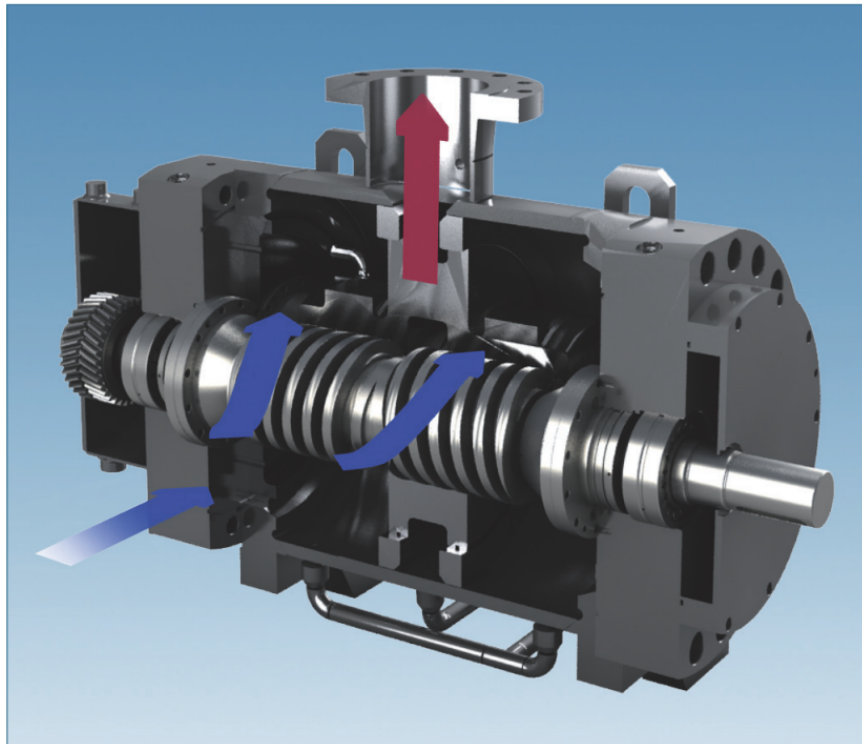


Abbildung 1-3: Aufbau einer MPP (L4HG) der Fa. Leistritz [LePu2010]



**Abbildung 1-4: Modell L4 Multiphasenpumpe der Fa. Leistritz [LePu2011]**

### **Funktionsweise einer Schraubenspindelpumpe**

„Die Pumpen sind mit 2 achsparallel angeordneten und gegensinnig rotierenden Schraubenspindeln ausgerüstet. Deren Flanken greifen so ineinander, dass geschlossene Kammern entstehen. Infolge der Drehbewegung der Spindeln gelangt das in den Kammern befindliche Gemisch von der Saug- zur Druckseite. Die Pumpen fördern daher volumetrisch. Sie sind in der Lage, den Druck der austretenden und mehrphasig strömenden Gemische aus Öl, wässriger Salzlösung und Erdgas soweit zu erhöhen, dass diese über große Entfernungen zu den entsprechenden Anlagen für Phasenseparation und Weiterverarbeitung transportiert werden können.“ [AlGa2008]

Einsatzgrenzen der MPPs von Fa. Leistritz [LePu2011]:

- Differenzdruck: bis 150 bar
- Fördermenge: bis 5000m³/h
- Viskosität: bis 150.000 cSt
- Betriebstemperatur: bis 350°C



## 2 Ausgangssituation

In diesem Kapitel erfolgen die Darstellung des Ist-Zustandes und die Präzisierung der Aufgabenstellung. Dazu wird für das Aufgabenverständnis der Transaktionsserver und seine Funktionen erläutert. Zum Abschluss erfolgt die Zusammenstellung der Aufgabenstellung in Form eines Pflichtenheftes.

### 2.1 Aufbau eines MPP-Skids

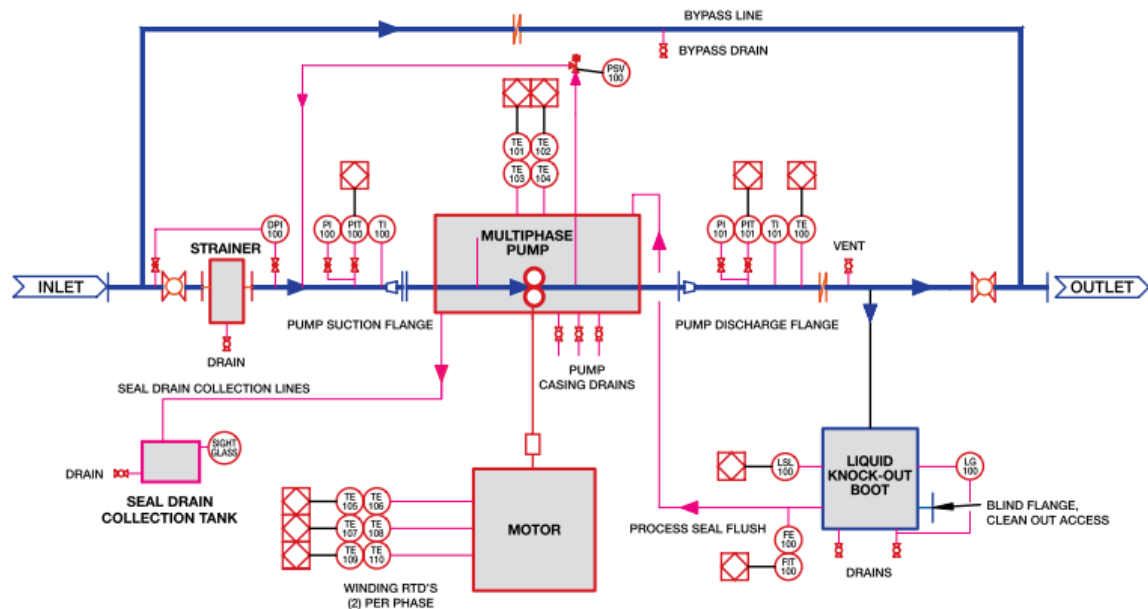


Abbildung 2-1: R&I-Schema einer MPP-Anlage [LePu2010]

Das ausgewählte System beinhaltet alle der möglichen Komponenten eines Multiphasenpumpen-Aggregats.

Die Anlage besteht aus folgenden Komponenten:

- Prozess (System mit Multiphasen-Medium)
- Motor (Antriebseinheit, geregelt mit einem Frequenzumrichter)
- Multiphasenpumpe
- Zusatzaggregate (Seal- und Lube Oil-System, inklusive des Öltanks etc.)

## **Prozess**

- Ein- und Ausgangsventil
- Filter mit Differenzdrucküberwachung
- Messungen Saugseite (Druck und Temperatur)
- Differenzdruck zwischen Saug- und Druckseite (optional)
- Messungen Druckseite (Druck und Temperatur)

## **Motor**

- Wicklungstemperaturen
- Lagertemperaturen

## **Pumpe**

- Vibrationssensoren
- Lagertemperatur (je 2 Stück für Lauf- und Antriebsspindel)

## **Zusatzaggregate**

- Dichtöl-Kreislauf (Seal Oil)
- Schmieröl-Kreislauf (Lube Oil)
- Rezirkulationsbehälter

Alle Messgeräte werden mit einem Ausgang 4-20mA passiv (keine eigene Versorgung des Messaufnehmers erforderlich) verwendet. Für diese Messungen ist nur ein zweiadriges Kabel notwendig, die Versorgung wird durch eine Barriere für eigensichere Kreise oder direkt von der SPS bereitgestellt.

Alle Messungen haben eine Alarmmeldung und eine Abschaltfunktion. Die Alarme / Abschaltungen sind in 2 Gruppen aufgeteilt:

- Prozess inkl. Pumpe und Motor
- Gesamte Anlage

Die Alarmmeldungen bewirken eine Einschaltsperr

- Prozess – Einschaltsperr des Prozesses (Mehrphasenpumpe), kein Einfluss auf die Zusatzaggregate
- Gesamte Anlage – Einschaltsperr für Prozess und Zusatzaggregate

Bei einer Abschaltung wird zuerst der Prozess abgeschaltet, Pumpe aus und Ventile schließen. Ist die Pumpe abgeschaltet und die Ventile geschlossen, werden die Zusatzaggregate abgeschaltet (nur bei einer Abschaltung der Gruppe „Gesamte Anlage“).

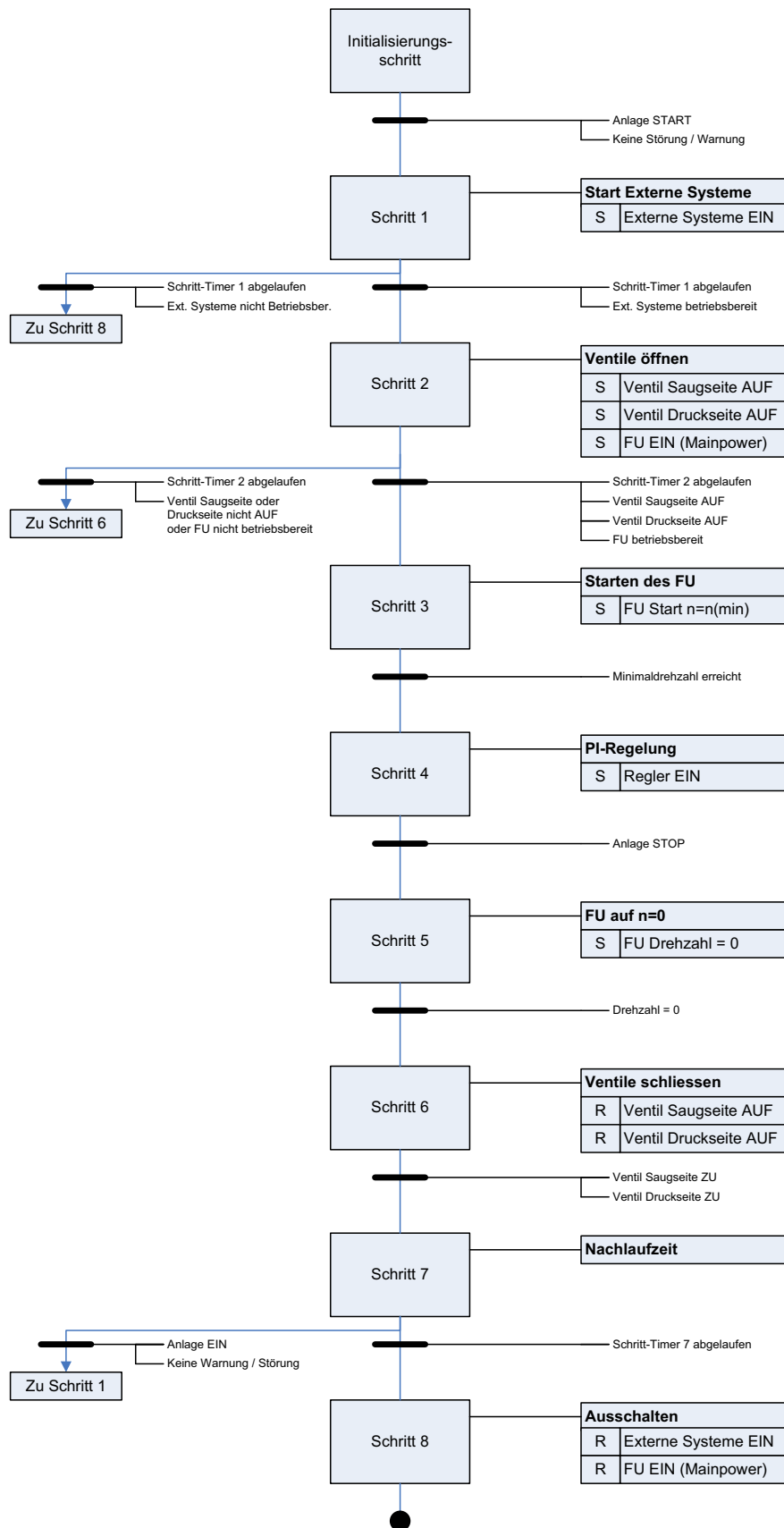
Werden die Zusatzaggregate abgeschaltet, während die Pumpe noch in Betrieb ist, kann das zu erheblichen Schäden an der Pumpe führen.

- Prozess (System mit Multiphasen-Medium)
- Motor (Antriebseinheit, geregelt mit einem Frequenzumrichter)
- Multiphasenpumpe
- Zusatzaggregate (Seal- und Lube Oil-System, inklusive des Öltanks, etc.)

## **2.2 Anlagensteuerung**

Der Steuerungsablauf der Anlage kann als Schrittkette dargestellt werden. Diese Programmierung als Schrittkette ist steuerungsunabhängig und kann dadurch auf allen Steuerungstypen, mit relativ wenig Aufwand, umgesetzt werden. Bei einer Auslegung der Schrittkette auf den maximalen Anlagenausbau kann sie als Standard für alle weiteren Anlagen verwendet werden. Besitzt die Anlage kein Seal- / Lube-Oil-System, werden die dazugehörigen Schritte übersprungen und die betroffenen Weberschaltkriterien auf Logisch „1“ gesetzt.

Die folgende Schrittkette umfasst alle Komponenten der Anlage und wurde auf Grund der Erfahrungen der bereits umgesetzten Anlagen angepasst.



**Bemerkungen**  
Schritt-Timer werden bei aktivieren des zugehörigen Schrittes gestartet.

**Abbildung 2-2: Schrittkette der MPP-Anlage**



## 2.3 Steuerungsaufbau

Bei den bereits durchgeführten Projekten wurden Steuerungen der verschiedensten Hersteller eingesetzt. Der Endkunde / Betreiber bestimmte bei den meisten Projekten, welcher Steuerungstyp / Hersteller zu verwenden ist. In den Fällen ohne eine Vorgabe wurde eine Steuerung von Siemens (SIMATIC S7) verwendet.

Die Vorteile der Siemens SIMATIC S7 sind:

- Weltweite Verfügbarkeit der Komponenten
- Kurze Lieferzeiten (Express-Service fast überall möglich)
- Skalierbare Steuerung (S7-300 bis S7-400 HF)
- Verfügbarkeit der Programmierer

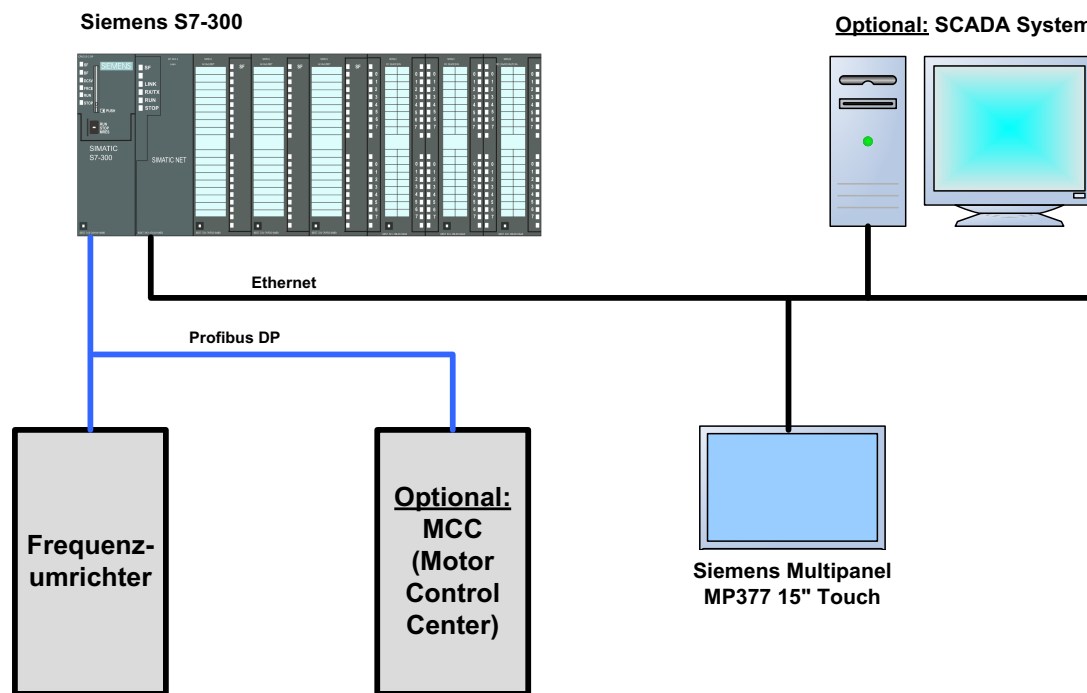


Abbildung 2-3: Steuerungsaufbau [SiSp2012]

Für den Standardaufbau der Steuerung wird eine S7-300 mit einer CPU-315-2DP (MPI und Profibusschnittstelle) gewählt. Der Frequenzumrichter und das MCC werden über Profibus DP an die Steuerung angebunden. Bedienstation (Multipanel MP377) und / oder ein SCADA System kommunizieren über Ethernet mit der Steuerung. Wird die Anlage ohne SCADA-System verwendet, kann auf den Ethernet-CP verzichtet werden und die Anbindung des MP377 über MPI erfolgen.

## 2.4 Regelung einer MPP

Die Mehrphasenpumpe muss für die optimale Förderung einen positiven Eingangsdruck aufweisen, da das System nur eine geringe Saugwirkung erzeugen kann. Eine technische Auslegung der Pumpe wird auf Grund folgender Faktoren durchgeführt:

- Eingangsdruck (maximal und minimal)
- Ausgangsdruck (maximal möglicher Druck in der Pipeline)
- Maximaler Differenzdruck
- Medium – Temperatur und chemische Zusammensetzung

Bei zu hohem Differenzdruck kann es zu einer Berührung zwischen Spindel und Innenwand kommen und dadurch einen erheblichen Schaden an beiden Teilen verursachen. Die Überschreitung des maximalen Ausgangsdruckes kann die Pipeline beschädigen, ein überhöhter Eingangsdruck beschädigt die Gleitringdichtungen an den Einlaufseiten. Diese Störungen führen zu einer sofortigen Abschaltung der Pumpe, für die Überwachung des Differenzdrucks ist zusätzlich noch ein mechanisches Überdruckventil eingebaut.

Die Drehzahl der Pumpe kann an Hand des Eingangsdruckes oder über den Füllstand eines vorgelagerten Behälters geregelt werden. Beide Möglichkeiten sind direkt abhängig von der Fördermenge des Bohrlochs oder der Pipeline. Eine Regelung des Ausgangsdruckes ist nicht möglich, da die Höhe des Druckes von der Beschaffenheit der Pipeline, der entnommenen Menge des Mediums und des Eingangsdruckes abhängt. Eine genaue Einstellung des Reglers kann nur unter Produktionsbedingungen durchgeführt werden, der Testlauf wird mit einem Standard-Öl durchgeführt und dient nur zum Funktionstest der Anlage (Hard- und Software).

Folgende Punkte sind bei der Einstellung des Reglers zu beachten:

- Schnelle Nachregelung bei Anstieg des Eingangsdruckes
- Relativ unempfindlich für kurze Druckstöße nach oben und unten
- Geringes Überschwingen

Es wird für die Regelung der Pumpendrehzahl ein PI-Regler verwendet. Der PID-Regler ist ein Standardregler in der Regelungstechnik und kann in jedem einschlägigen Fachbuch sowie im Internet nachgeschlagen werden. Für jeden Steuerungstyp ist ein Standardbaustein für den PID-Regler vorhanden und kann ohne große Kenntnisse der Reglerfunktion verschaltet und eingestellt werden.

### **Regler allgemein:**

„Die schnellsten Regler sind die mit einem D-Anteil (PD und PID). Der D-Anteil kommt deshalb hauptsächlich zum Einsatz, wenn schnelle Dynamik gefragt ist oder die Strecke selbst schon instabil ist. Voraussetzung für die Schnelligkeit ist allerdings, dass keine Begrenzung im Stellglied oder Aktuator auftritt. In der Praxis ist eine Begrenzung meistens nicht zu vermeiden, deshalb gilt die Sprungantwort in der Praxis nur für kleine Sprünge.“ [RNWi2012]

„Die Regler ohne D-Anteil, aber mit P-Anteil (P und PI) sind mittelschnell. Für einfache Regelaufgaben reicht auch oft schon ein reiner P-Regler aus, wenn die bleibende Regelabweichung vernachlässigt werden kann oder weil die Strecke schon einen I-Anteil besitzt.“ [RNWi2012]

Ein MPP-System benötigt keine schnelle Dynamik des Reglers, ebenso soll keine bleibende Reglerabweichung entstehen. Für die Aufgabe der Druckregelung ist der PI- Regler die sinnvollste Variante.

Bei SIMATIC-S7 Steuerungen kommt der Regler FB 41 "CONT\_C"( kontinuierlicher Regler) aus der Standardbibliothek von Siemens zum Einsatz. Dieser Baustein ist für die Steuerungstypen S7-300 und S7-400 verfügbar.

In diesem Regler können alle Anteile (P, I und D) getrennt voneinander über die Visualisierung zu- und abgeschaltet werden.

Als Istwert wird der Eingangsdruck (normiert) direkt aufgeschaltet (SP\_INT) und der Sollwert (PV\_IN, PVPER\_ON =1) kann über ein Bedienpanel oder ein SCADA System vorgegeben werden. Der Ausgang LMN kann direkt auf den Frequenzumrichter, als Drehzahlvorgabe, geschaltet werden, die Normierung der Drehzahl erfolgt über die Eingänge LMN\_HLM und LMN\_LLM (obere Grenze und untere Grenze der Drehzahl).

Zusätzlich können über das Panel folgende Werte eingestellt werden:

<u>Eingang</u>	<u>Beschreibung</u>	<u>Standardwert</u>
GAIN	$K_P$ (Verstärkung)	-4
TI	$T_N$ (Nachstellzeit)	0,5 s
MAN_ON	Hand / Automatik	0 = Automatik

Auf Grund der negativen Verstärkung wird die Regelrichtung umgekehrt.

Positiver  $K_P$

Setpoint > Prozessvalue	positive Sollwertvorgabe
Setpoint < Prozessvalue	negative Sollwertvorgabe

Negativer  $K_P$

Setpoint > Prozessvalue	negative Sollwertvorgabe
Setpoint < Prozessvalue	positive Sollwertvorgabe

Ist der Setpoint des Eingangsdruckes kleiner als der tatsächliche Druck, muss die Pumpe schneller drehen. Die Differenz zwischen Setpoint und realem Wert ist negativ, dadurch nimmt die Drehzahl (Stellwert) bei positivem  $K_P$ , ab und bei negativem  $K_P$  steigt die Drehzahl.

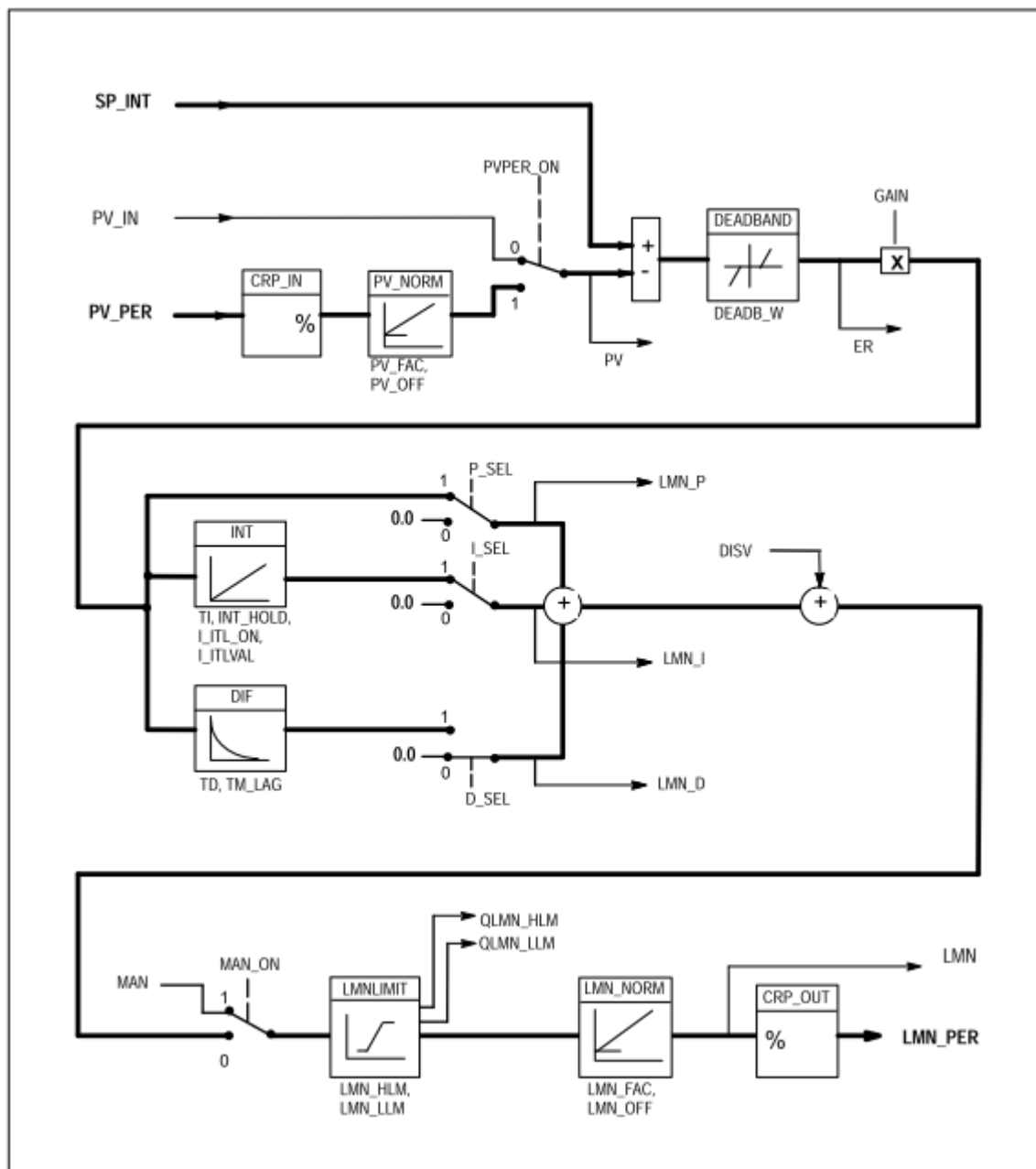


Abbildung 2-4: Blockschaltbild Siemens FB41 PID-Regler [Siem2012]

Die Regelung der aktuellen Anlagen ist auf einen konstanten Eingangsdruck ausgelegt. Bei der Einstellung der Anlagen hat sich eine Standardkonfiguration,  $K_P = -4$  und  $T_N = 0,5s$ , für den Siemensregler, ergeben.



### 3 Kennlinien

Für die Konzepterstellung ist es wichtig, den Zusammenhang zwischen Durchfluss, Leistungsaufnahme und Drehzahl zu analysieren.

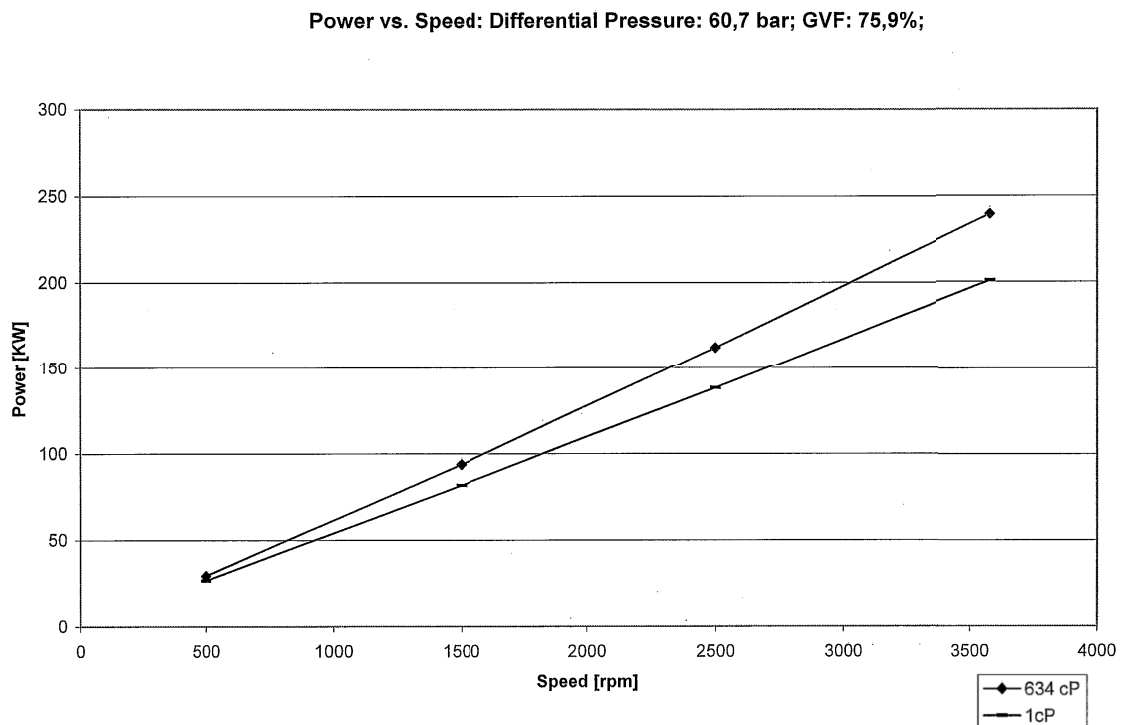
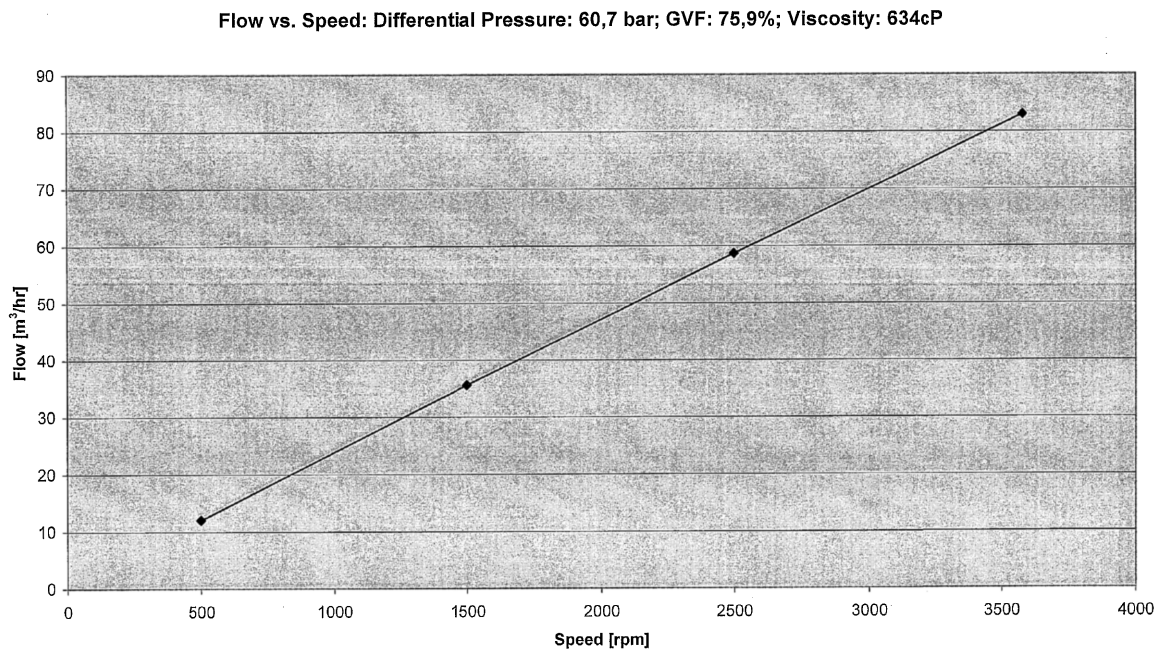


Abbildung 3-5: Pumpenkennlinie Leistung/Drehzahl [LeiP2012]

Kennlinie Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl bei konstantem Differenzdruck:

- Differenzdruck 60,7 bar und GVF 75,9% (Gasanteil)
- Linie 1cP – entspricht der Viskosität von Wasser
- Linie 634cP – Viskosität von Erdöl in Surinam

Die beiden Graphen sind annähernd gerade, die Leistung steigt proportional zur Drehzahl an. Bei höherer Viskosität sind die Verluste höher als bei Wasser.



**Abbildung 3-6: Pumpenkennlinie Durchfluss/Drehzahl [LeiP2012]**

Bei 60,7 bar Differenzdruck und einer Viskosität des Mediums von 634cP wird der Durchfluss / Fördermenge bei Drehzahlen von 500 – 3500 Umdrehungen pro Minute dargestellt.

Der Durchfluss steigt proportional mit der Drehzahl an, dadurch kann angenommen werden, dass die Drehzahl in % dem Durchfluss in % annähernd entspricht. Für eine weitere Betrachtung der Regelkonzepte kann daher Folgendes angenommen werden:

1. Drehzahl in % entspricht der Fördermenge in %
2. Leistung bei konstantem Differenzdruck ist proportional zur Drehzahl



## 4 Steuerungskonzepte

Ein aktuelles Projekt besteht aus 2 Pumpen, die zu Beginn als Master- und Standby-Pumpe ohne automatische Umschaltung verwendet werden. Sollte das Erdölfeld die maximale Kapazität der Pumpe überschreiten, wird die zweite von Hand zugeschaltet und mit einer festen Drehzahl betrieben. Es ist angedacht, noch zwei weitere Pumpen für dieses Ölfeld zu liefern und in diesem Zug die Ansteuerung der Pumpen anzupassen. Das Ziel ist eine automatische Zuschaltung von max. 2 Pumpen, die vierte Pumpe wird als Standby verwendet. Mit dieser Konstellation kann eine Revision oder Reparatur einer Pumpe ohne Probleme durchgeführt werden.

Für die Betrachtung wird ein Pumpenverbund von 5 MPPs angenommen, es sollen alle 5 Pumpen eingesetzt werden können.

Nach einer Absprache mit dem Kunden haben wir 3 mögliche Varianten der Pumpensteuerung für die genauere Betrachtung ausgewählt.

### Konzept 1 - Regelung einer Pumpe

Die Drehzahlregelung erfolgt nur bei einer Pumpe (Führungspumpe). Weitere Pumpen werden bei Anforderung mit einer Festdrehzahl zugeschaltet.

### Konzept 2 - Drehzahlregelung aller Pumpen (gleicher Sollwertvorgabe)

Gestartet wird eine Pumpe, die bei Anforderung zugeschalteten Pumpen werden mit **einem** Drehzahl-Sollwert versorgt.

### Konzept 3 - Optimierte Regelung der Pumpen

Auf Grund der steigenden Energiepreise muss die Möglichkeit betrachtet werden, die Pumpen möglichst Energieeffizient einzusetzen. Für dieses Konzept müssen die Kennlinien der Pumpen und Motoren ausgewertet werden.

## 4.1 Konzept 1 – Regelung einer Pumpe

Als erste Ausgangssituation wird ein Pumpenverbund von 5 gleichen Pumpen betrachtet.

Es wird eine Pumpe (Führungspumpe) gestartet und anhand des Eingangsdruckes die Drehzahl der Pumpe geregelt. Wird der eingestellte Eingangsdruck für eine definierte Zeit bei einer Drehzahl von >90% überschritten, soll die zweite Pumpe gestartet und entlang einer vorgegebenen Rampe auf eine Drehzahl von 50% gefahren werden. Die zweite Pumpe kann am Anfang nicht mit 100% gestartet werden, da der benötigte Durchfluss nicht bestimmt werden kann. Bei 50% der Drehzahl von Pumpe 2 kann bei leichter Überschreitung des benötigten Durchflusses die erste Pumpe noch mit ca. 50% betrieben werden. Dadurch kann die Pumpe frei nach oben und unten auftretende Druckschwankungen ausgleichen.

### 4.1.1 Zuschaltung von Pumpen gleicher Leistung

In den folgenden Diagrammen wird die Auswirkung der Zuschaltung verschiedener Förderleistungen auf den Regelungsbereich dargestellt. Der rote Bereich bildet den maximal möglichen Regelbereich der Pumpe ab, der blaue stellt die zugeschaltete Förderleistung (Pumpe mit Festdrehzahl) dar. Nach Addition beider Werte ergibt sich der Gesamtbereich des maximal möglichen Fördervolumens.

Die gestrichelte Linie ist die angenommene benötigte Förderleistung des Pumpenverbunds.

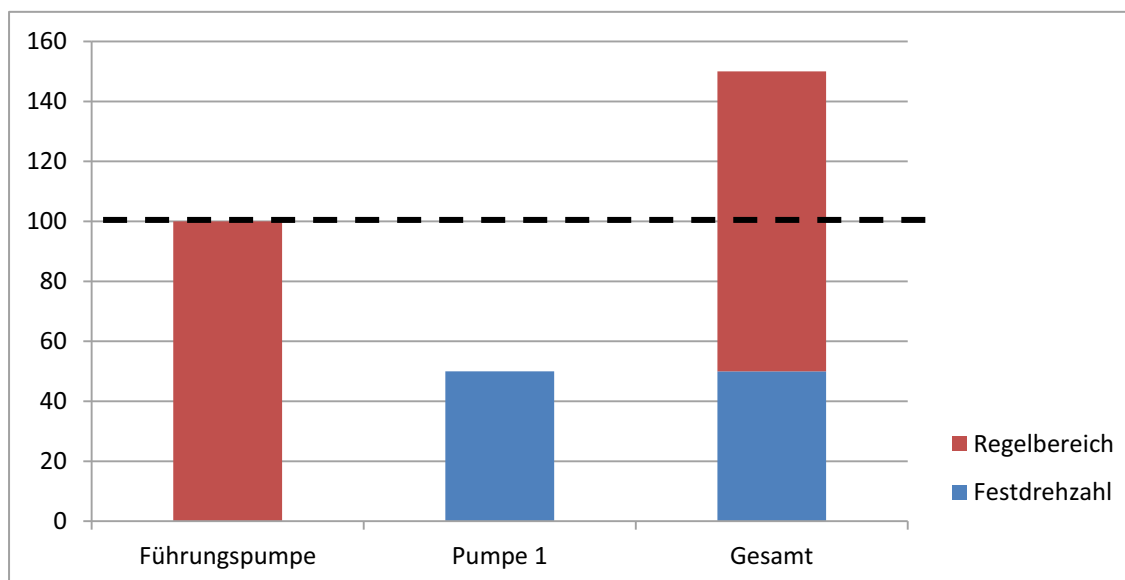
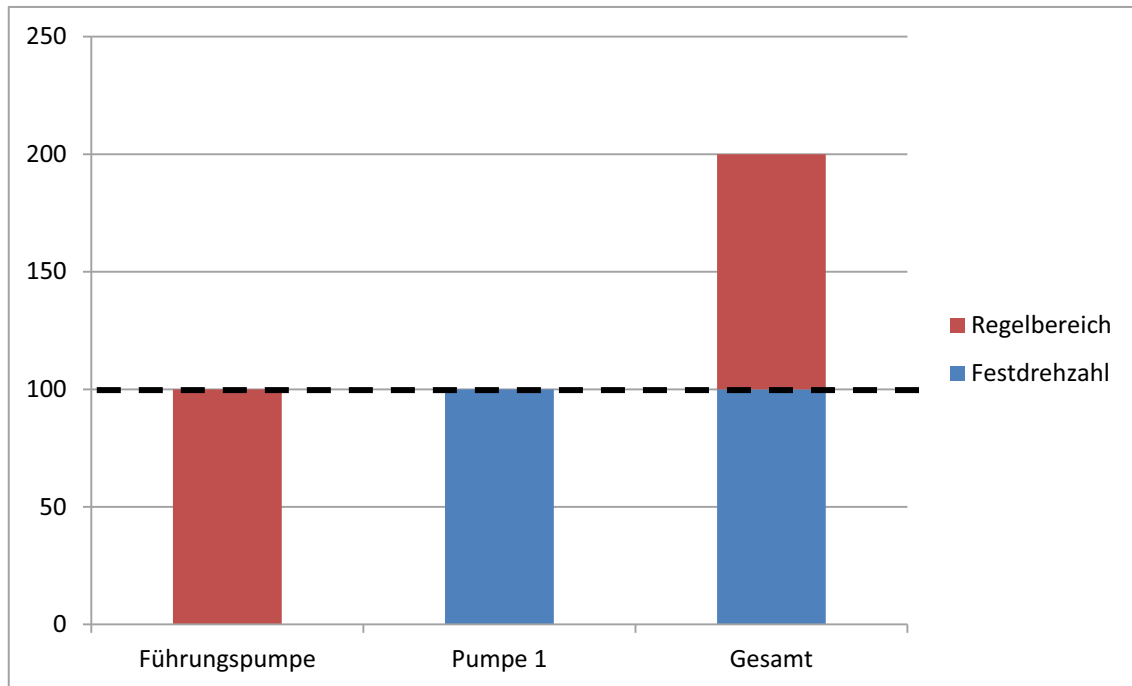


Abbildung 4-1: Konzept 1 Zuschaltung mit 50% Leistung

Bei diesem Diagramm ist der Regelbereich nach der Zuschaltung der zweiten Pumpe ca. 50% nach Oben und Unten, wenn für die Einhaltung des eingestellten Eingangsdrucks 100% Durchfluss / Drehzahl einer Pumpe erforderlich sind.



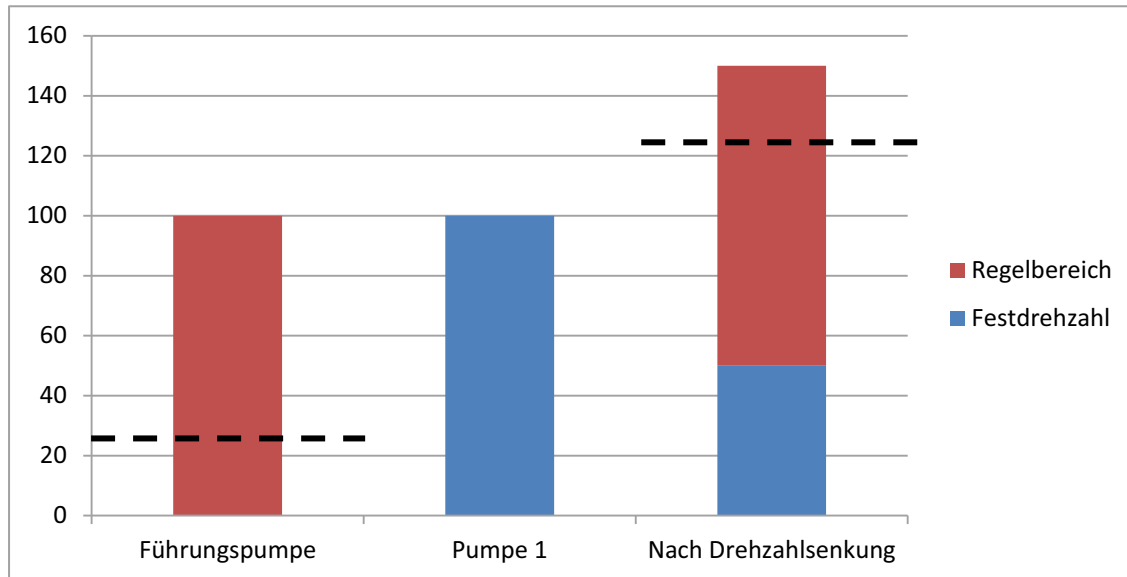
**Abbildung 4-2: Konzept 1 Zuschaltung mit 100% Leistung**

Bei Zuschaltung von 100% bei Pumpe 2 ist der mögliche Regelbereich nur mehr nach oben vorhanden. Schwankungen nach unten können nicht mehr ausgeglichen werden. Sollte der Druck leicht sinken, wird automatisch die Pumpe 1 ausgeschaltet, dadurch erhöhen sich die Ein-/Ausschaltvorgänge und damit auch die Störungen im System.

Reicht die Förderleistung der beiden Pumpen nicht aus um den Eingangsdruck konstant zu halten, wird die Drehzahl der Pumpe 2 auf 100% erhöht. Im nächsten Schritt wird die Pumpe 3 mit 50% zugeschaltet und die Drehzahl wird bei Bedarf erhöht. Pumpe 4 und 5 folgen analog zu Pumpe 2 / 3. Bei Störung einer Pumpe wird die nächste Pumpe zugeschaltet und übernimmt die Förderleistung der gestörten Pumpe. Fällt die Führungspumpe aus, wird die Pumpe 2 zur Führungspumpe und eine weitere wird zusätzlich zugeschaltet.

#### 4.1.2 Drehzahlsenkung / Abschaltung einzelner Pumpen

Die Absenkung der Drehzahl / Abschaltung einzelner Pumpen kann anhand der Drehzahl der Führungspumpe erfolgen. Ist die Drehzahl der Führungspumpe auf 25%, kann bei einer Pumpe die Drehzahl zurückgeschaltet werden. Nach Absenken der Drehzahl einer Pumpe um 50%, hat die Führungspumpe noch ca. 75% der maximalen Drehzahl und kann damit Druckschwankungen nach oben und unten noch ausgleichen.



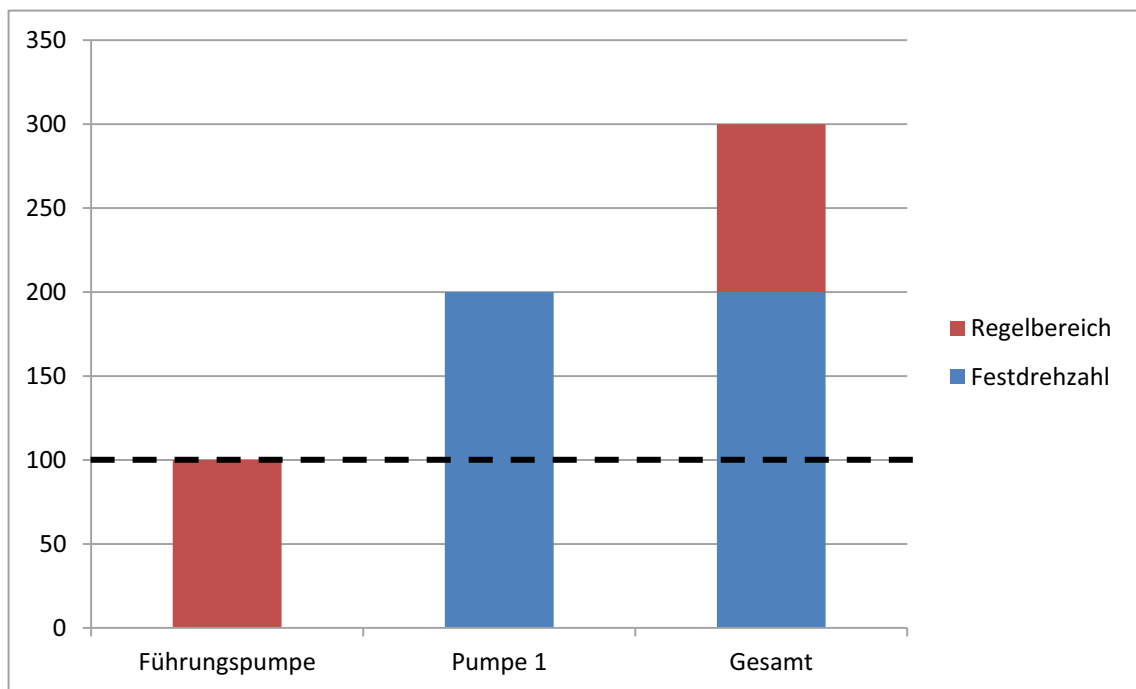
**Abbildung 4-3: Konzept 1 Drehzahlsenkung um 50% Leistung**

In diesem Diagramm wird der mögliche Regelbereich bei aktuell 25% Drehzahl der Führungspumpe, vor und nach der Drehzahlsenkung von Pumpe 1, dargestellt. Vor der Drehzahlsenkung ist der Regelbereich nach unten nur 25% und nach oben der Rest (75%), nachher ist es umgekehrt.

### 4.1.3 Zuschaltung von Pumpen unterschiedlicher Leistung

Die Betrachtungen waren für Pumpen mit annähernd gleicher Durchflussleistung. Die folgenden Diagramme zeigen verschiedene Pumpenkonstellationen.

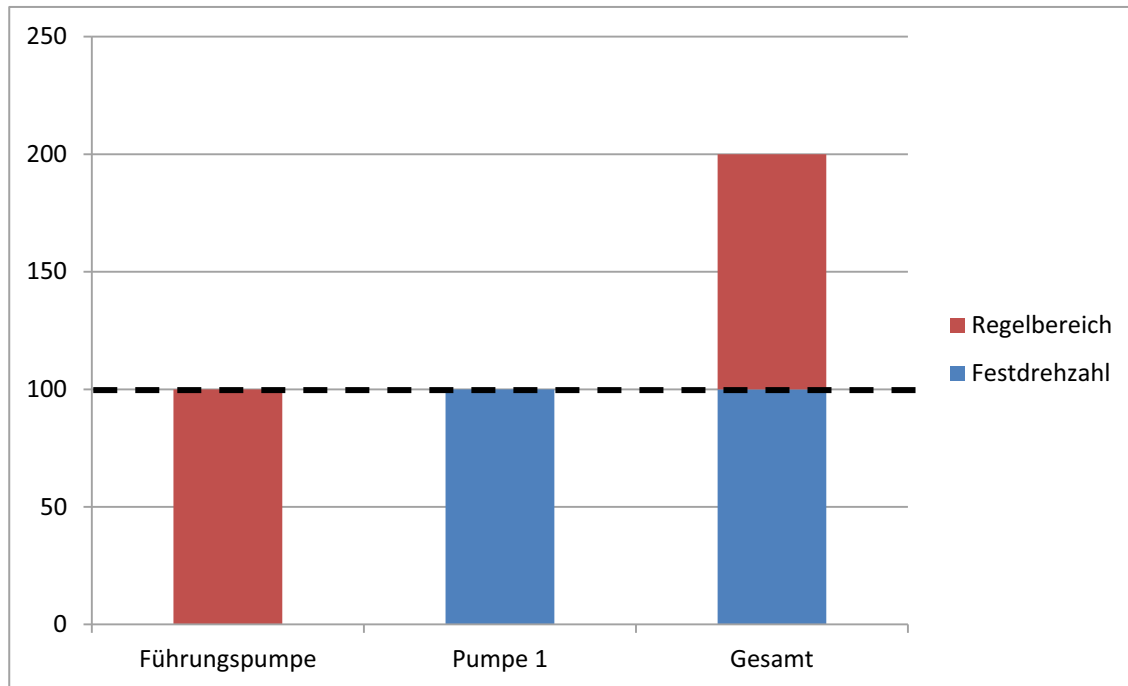
Annahme 1: Pumpe 1 hat die vierfache Leistung der Führungspumpe, Zuschaltung 50%



**Abbildung 4-4: Konzept 1 Zuschaltung um 200% Leistung (unterschiedliche Pumpen)**

Bei Zuschaltung der doppelten Pumpenleistung der Führungspumpe kann eine Regelung nach oben und unten nicht mehr erfolgen. Dadurch wird mehr Medium gefördert, der Eingangsdruck sinkt und die Pumpe beginnt zu „saugen“. Wird der Eingangsdruck zu niedrig, besteht die Möglichkeit, dass vorhandene Gasblasen schnell expandieren und dadurch hohe Vibrationen an der Pumpe verursachen. Bei Überschreitung des Grenzwertes werden die Pumpen abgeschaltet.

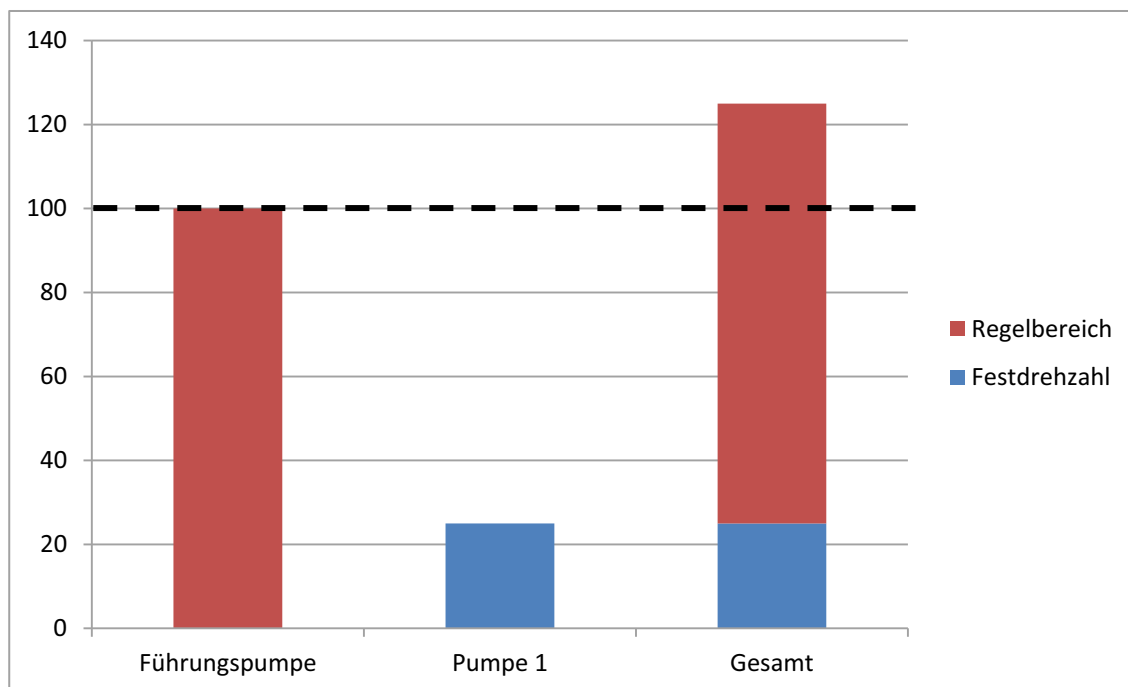
Annahme 2: Pumpe 1 hat die vierfache Leistung der Führungspumpe, Zuschaltung 25%



**Abbildung 4-5: Konzept 1 Zuschaltung um 100% Leistung (unterschiedliche Pumpen)**

In diesem Fall kann die Führungspumpe nur mehr nach oben regeln, nach unten ist keine Möglichkeit der Drehzahlsenkung.

Annahme 2: Pumpe 1 hat ein Viertel Leistung der Führungspumpe, Zuschaltung Pumpe 1



**Abbildung 4-6: Konzept 1 Zuschaltung um 25% Leistung (unterschiedliche Pumpen)**

Bei diesem Beispiel kann die Pumpe nach oben und unten regeln, nach oben ist es jedoch mit 25% der Pumpenleistung begrenzt.

Aus diesen Diagrammen folgt, dass die Zuschaltung von Pumpe 1 mit ca. 50% Leistung der Führungspumpe erfolgen sollte. Dadurch ist gewährleistet, dass der Regler in beide Richtungen ausregeln kann. Bei Pumpen, deren Leistungen stark unterschiedlich sind, empfiehlt es sich, die größte als Führungspumpe zu verwenden, dadurch ergibt sich der größtmögliche Regelbereich. Durch die Zuschaltung kleinerer Pumpen ist der mögliche Regelbereich nach oben durch die Einzelpumpenleistung der zugeschalteten Pumpe begrenzt.

#### **4.1.4 Fazit Konzept 1**

##### Vorteile – Pumpenverbund mit identischen Pumpen

- + Jede Pumpe kann als Führungspumpe verwendet werden
- + Reglereinstellung bei 5 gleichen Pumpen nur einmal nötig
- + Pumpen 2-4 können im optimalen Betriebspunkt betrieben werden
- + Priorisierte Zuschaltung der Pumpen nach Anzahl der Betriebsstunden möglich
- + Einfache Programmierung / Erweiterung

##### Nachteile - Pumpenverbund mit unterschiedlichen Pumpengrößen

- Reglereinstellung - je Pumpengröße einmal vorzunehmen (sehr schwierig, da das vorhandene Fördervolumen zur Pumpe passen muss)
- Auswahl der Führungspumpe
- Genaue Betrachtung aller Zuschaltmöglichkeiten notwendig / Sperre in der SPS
- Eine priorisierte Zuschaltung nur begrenzt möglich

Auf Grund der Ergebnisse ist eine Zusammenschaltung von Pumpen mit sehr unterschiedlichen Förderleistungen nur bedingt empfehlenswert. Eine Reservepumpe für diesen Anwendungsfall sollte wie die größte eingesetzte Pumpe dimensioniert werden, um einen vollen Ersatz für einen Pumpenausfall zu gewährleisten. Es ist ebenso zu berücksichtigen, dass bei identischen Pumpen geringere Kosten für die Ersatzteilkhaltung entstehen. Die Zuschaltung / Abschaltung von identischen Pumpen kann an Hand von Betriebsstunden durchgeführt werden.

### 4.1.5 Programmiermodell

Ausgangssituation:

- Alle Pumpen sind identisch
- Führungspumpe (Drehzahlregelung)
- Pumpe 1-4 (Festdrehzahlen)

Bei Überschreitung der eingestellten Drehzahl und des eingestellten Eingangsdruckes (Sollwert des Reglers) wird die Pumpengesamtleistung erhöht – Zähler Z inkrementieren um 1. Wird der Abschaltpunkt für den definierten Zeitraum unterschritten, wird die Pumpenleistung gesenkt – Zähler Z dekrementieren um 1.

Mit dem Zählerstand Z werden die einzelnen Pumpen gestartet bzw. der Festdrehzahlwert erhöht.

Hiermit kann auch die Steuerung von Pumpenkonstellationen mit unterschiedlichen Pumpengrößen realisiert werden.

Pumpe	Leistung	Anzahl Festdrehzahlen (Z)	Festdrehzahl 1	Festdrehzahl 2
Führungspumpe	100%			
Pumpe 1	100%	2	50%	100%
Pumpe 2	100%	2	50%	100%
Pumpe 3	100%	2	50%	100%
Pumpe 4	100%	2	50%	100%
Summe	500%	8		

**Tabelle 4-1: Konzept 1 Ausgangssituation Programmiermodell**

Die Werte für

- Drehzahlgrenze Zuschaltung
- Drehzahlgrenze Abschaltung
- Zeitverzögerung für Abschaltung / Zuschaltung
- Festdrehzahlen je Pumpe (Anzahl und Drehzahl)

werden als Anlagenparameter definiert.



## Ansteuerung der Pumpen

Für die Zuschaltung der Pumpen wird ein Zähler (Z) verwendet und jeder Pumpe ist ein Wert zugeordnet. Der Wert entspricht der Anzahl der möglichen Festdrehzahlen (z.B. Wert = 2, 1=50% und 2=100%). Anhand des Zählers und der Reihenfolge der Zuschaltung ergibt sich die Festdrehzahl jeder eingeschalteten Pumpe.

Die maximale Größe des Zählwertes Z ist die Summe aller Pumpenwerte (Anzahl der Festdrehzahlen).

Z      Zähler

ZP1    Anzahl der Festdrehzahlen Pumpe 1

z.B. ZP1 = 1 entspricht 50%, ZP2 = 2 entspricht 100% Drehzahl

ZP2    Anzahl der Festdrehzahlen Pumpe 2

Beispiel:

$Z < 0$                       keine Zuschaltung, Führungspumpe läuft

$Z \geq ZP1$                   Pumpe 1 maximale Festdrehzahl

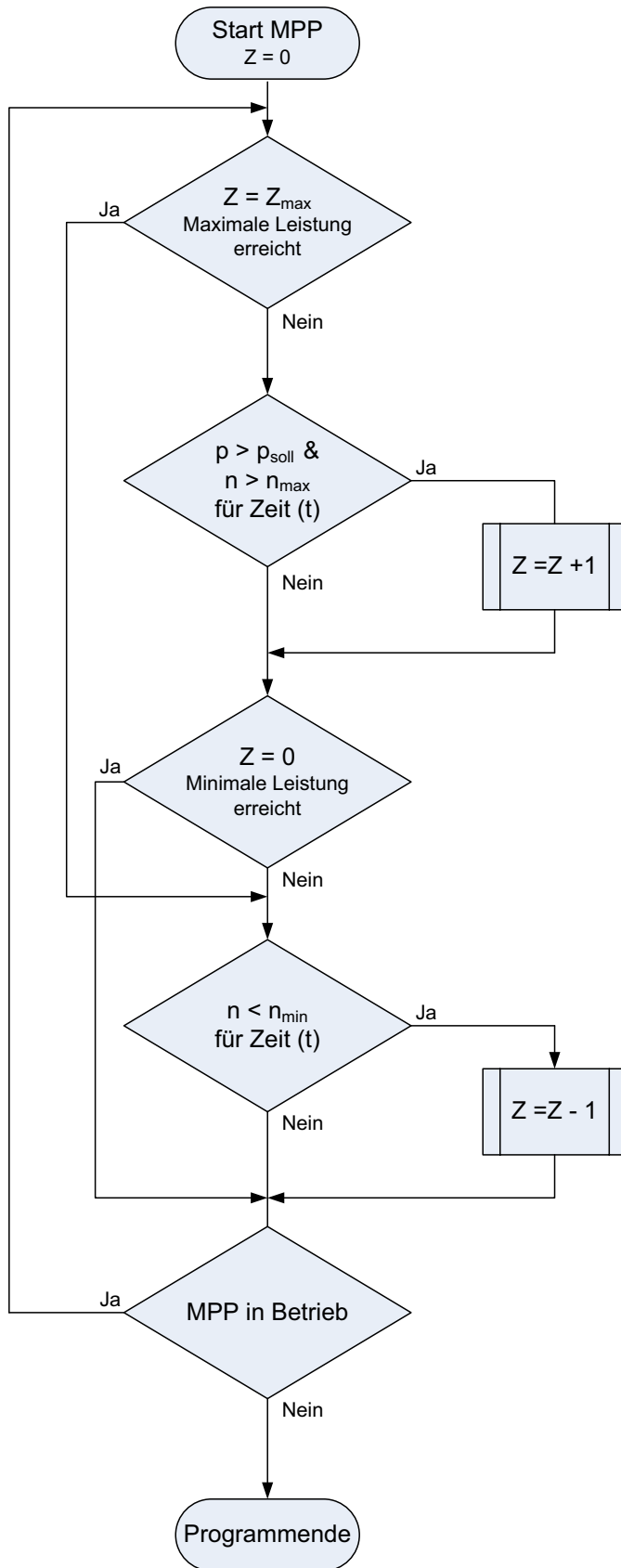
$Z < ZP1$                   Pumpe 1 Festdrehzahl (Z)

$Z - ZP1 \geq ZP2$             Pumpe 2 maximale Festdrehzahl

$Z - ZP1 < ZP2$             Pumpe 2 Festdrehzahl (Z-ZP1)

usw.

## Ablaufdiagramm:



## Zuschaltmatrix:

Zähler (Z)	Zuschaltung
0	Startzustand
1	Pumpe 1 mit 50%
2	Pumpe 1 auf 100%
3	Pumpe 2 mit 50%
4	Pumpe 2 auf 100%
5	Pumpe 2 mit 50%
6	Pumpe 2 auf 100%
7	Pumpe 2 mit 50%
8	Pumpe 2 auf 100%

Tabelle 4-2: Konzept 1 Zuschaltmatrix

Abbildung 4-7: Konzept 1 Ablaufdiagramm

## 4.2 Konzept 2 - Regelung aller Pumpen (identischer Sollwert)

Bei diesem Konzept wird zuerst eine Pumpe gestartet, bei der Zuschaltung der nächsten Pumpe wird die Drehzahl entlang einer Rampe bis zur Drehzahl der ersten hochgefahren. Die Hochlaufzeit der zweiten Pumpe muss langsam erfolgen, um mit dem PI-Regler die Schwankungen der Druckes sowie die Erhöhung des Durchflusses (= Absenkung des Eingangsdruckes) durch die zweite Pumpe zu ermöglichen. Haben beide Pumpen annähernd identische Drehzahl, wird der Sollwert des PI-Reglers auf beide Pumpen aufgeschaltet und die Reglerparameter werden automatisch angepasst. Die Drehzahlvorgabe des Reglers wird in % der Maximaldrehzahl angegeben, dadurch ist es möglich verschiedenen Pumpen zu kombinieren. Bei Steigen des Eingangsdruckes und mehr als 95% Drehzahlvorgabe wird die nächste Pumpe zugeschaltet und langsam hochgefahren, usw. Bei unterschiedlichen Pumpengrößen kann mit der gleichen Methode zugeschaltet werden.

Eine Abschaltung einer Pumpe muss in diesem Fall genauer betrachtet werden, es kann nicht pauschal bei einer bestimmten Drehzahl (%) ausgeschaltet werden. Je nach Anzahl der eingeschalteten Pumpen muss die Abschaltdrehzahl angepasst werden

### 4.2.1 Ausgangssituation:

Alle Pumpen (1 bis 5) sind eingeschaltet und die Drehzahl für die Abschaltung der Pumpe 5 soll ermittelt werden. Nach Abschaltung der Pumpe 5 soll der mögliche Regelbereich nach oben 50% einer Pumpenleistung betragen. Wird der Regelbereich zu klein definiert, kann sich die Anzahl Schaltvorgänge (Ein-/Ausschalten von Pumpen) erhöhen.

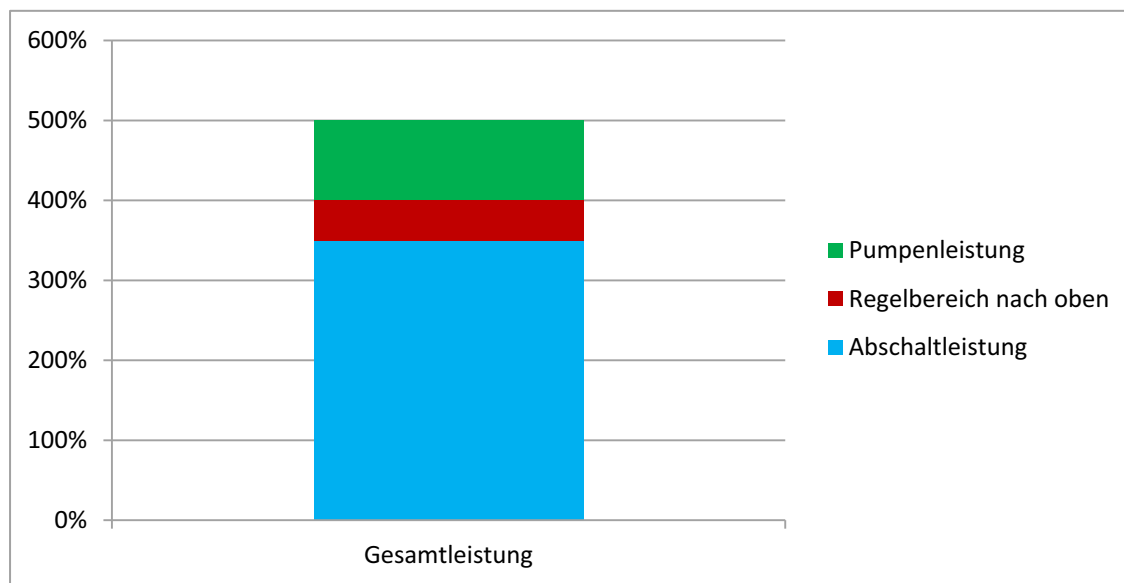
#### Annahme 1:

- 5 gleiche Pumpen
- Regelbereich + / - 50% einer Pumpe

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	100%	100%	100%	100%
Gesamtleistung	100%	200%	300%	400%	500%
Regelbereich nach oben/unten		50%	50%	50%	50%

Tabelle 4-3: Konzept 2 Ausgangssituation

## 4.2.2 Abschaltung von Pumpen



**Abbildung 4-8: Konzept 2 Ermittlung des Abschaltpunktes**

Die Abschaltleistung ermittelt sich aus der Gesamtleistung abzüglich der Einzelpumpenleistung und dem gewünschten Regelbereich nach oben. Der Regelbereich nach unten hat für die Berechnung keinen Einfluss, solange mehr als 2 Pumpen in Betrieb sind.

Nach Berechnung der Abschaltleistung des gesamten Pumpenverbunds kann der Abschaltpunkt, d.h. die Vorgabe für alle Pumpen (0 bis 100%), durch Division mit der Anzahl aller eingeschalteten Pumpen ermittelt werden.

P	Pumpenleistung
P <sub>g</sub>	Gesamtpumpenleistung
R <sub>b</sub>	Regelbereich
P <sub>a</sub>	Abschaltleistung (Bereich: 0..100%)
N	Anzahl der aktiven Pumpen vor Abschaltung

$$P_a = \frac{P_g - P - R_b}{N}$$

Nach der Abschaltung einer Pumpe wird die Abschaltleistung auf die verbleibenden Pumpen aufgeteilt. Daraus ergibt sich folgende Formel für die Pumpenleistung nach Abschaltung einer Pumpe.

$$P_n = \frac{P_g - P - R_b}{N - 1}$$

$P_n$  Errechneter Sollwert für die Pumpenleistung (Bereich: 0..100%)

In der folgenden Tabelle sind die Abschaltpunkte der einzelnen Pumpen aufgelistet, die sich aus der ermittelten Formel ergeben.

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	100%	100%	100%	100%
Gesamtleistung	100%	200%	300%	400%	500%
Regelbereich nach oben/unten		50%	50%	50%	50%
Abschaltpunkt / Drehzahl in %		25%	50%	62,50%	70%
Drehzahl nach Abschaltung		50%	75%	83,33%	87,50%

Tabelle 4-4: Konzept 2 Abschaltpunkte identischer Pumpen

## Annahme 2

- 5 Pumpen unterschiedlicher Leistung
- Pumpe 1 und 3: 100%, Pumpe 2 und 5: 50%, Pumpe 4: 25%

Durch die ungleichen Pumpenleistungen muss für diesen Fall die Berechnungsformel angepasste werden, es wird statt der Pumpenanzahl die Pumpengesamtleistung verwendet.

$$P_a = \frac{P_g - P - R_b}{P_b}$$

Nach der Abschaltung einer Pumpe wird die Abschaltleistung auf die verbleibenden Pumpen aufgeteilt. Daraus ergibt sich folgende Formel für die Pumpenleistung nach Abschaltung einer Pumpe.

$$P_n = \frac{P_g - P - R_b}{P_b - P}$$

$P_n$  Errechneter Sollwert für die Pumpenleistung (Bereich: 0..100%)

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	50%	100%	25%	50%
Gesamtleistung	100%	150%	250%	275%	325%
Regelbereich nach oben/unten		50%	50%	50%	50%
Abschaltpunkt / Drehzahl in %		33%	40%	73%	69%
Drehzahl nach Abschaltung		50,00%	66,67%	80,00%	81,82%
% bis zu nächsten Abschaltung		33,33%	40,00%	9,09%	

Tabelle 4-5: Konzept 2 Abschaltpunkte unterschiedlicher Pumpen

Die Tabelle zeigt, dass bei Abschaltung einer „kleinen“ Pumpe die Differenz zur nächsten Abschaltung relativ gering ist. Eine mögliche Lösung wäre, die leistungstärkste Pumpe als Pumpe 1 zu verwenden und danach die Abschaltung nach Pumpengröße durchzuführen – die kleinste zum Schluss vor Pumpe 1 abschalten. Ebenso sollte die Reihenfolge der Pumpen-Zuschaltung ausgeführt werden, kleine Pumpen haben die größte Wirkung je geringer die Gesamtpumpenleistung des Systems ist.

### Optimierte Abschaltung

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	25%	50%	50%	100%
Gesamtleistung	100%	125%	175%	225%	325%
Regelbereich nach oben/unten		50%	50%	50%	50%
Abschaltpunkt / Drehzahl in %		40%	43%	56%	54%
Drehzahl nach Abschaltung		50%	60%	71%	78%
% bis zu nächsten Abschaltung		20,00%	28,57%	22,22%	

Tabelle 4-6: Konzept 2 Abschaltpunkte unterschiedlicher Pumpen - optimiert

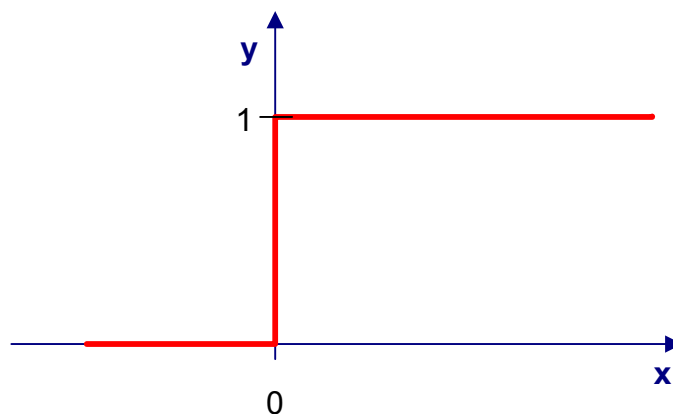
### 4.2.3 Anpassung der Regelparameter

Nach Zuschaltung bzw. Abschaltung einer Pumpe müssen die Reglerparameter an die entsprechende Pumpenleistung angepasst werden. Für die Steuerung wird ein PI-Regler verwendet, sowohl P als auch der I-Anteil werden einzeln betrachtet. Mit einer Simulation werden die Ergebnisse der theoretischen Regleranpassung analysiert.

Für die Anpassung der einzelnen Regleranteile wird die Sprungantwort auf einen Einheitssprung für eine und zwei identische Pumpen ermittelt. Die Parameter des P- und I-Reglers werden so angepasst, dass die Sprungantwort für eine und zwei Pumpen identisch ist. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für die Ermittlung der Regelparameter eines PI-Regler mit 1 bis 5 Pumpen.

#### Sprungantwort:

Die Sprungantwort eines Reglers ist die Reaktion auf einen Einheitssprung. Der Einheitssprung ist eine Funktion, die für alle negativen Zahlen der x-Achse NULL und für alle anderen Werte EINS ist.



**Abbildung 4-9: Einheitssprung**

## P-Anteil



Abbildung 4-10: Blockschaltbild P-Regler

Der Proportionalregler liefert eine Stellgröße, die proportional zur Reglerabweichung ist. Die Stellgröße ist immer durch einen maximalen und minimalen Wert begrenzt, dadurch geht der Regler bei großer Regelabweichung in die Sättigung. Der P-Regler benötigt eine endliche, Regelabweichung um reagieren zu können.

Das Übertragungsverhalten eines P-Reglers lautet:

$$y(t) = K_p * e(t)$$

$y(t)$  Ausgangssignal / Stellgröße

$e(t)$  Eingangssignal

$K_p$  Proportionalanteil / Verstärkung

## Sprungantwort P-Regler

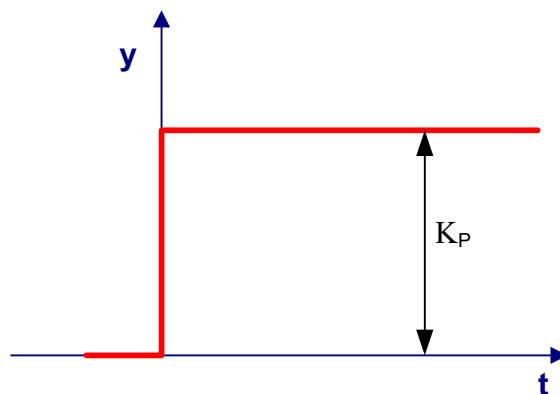


Abbildung 4-11: Sprungantwort P-Regler



### P-Regler mit Regelstrecke (2 Pumpen)

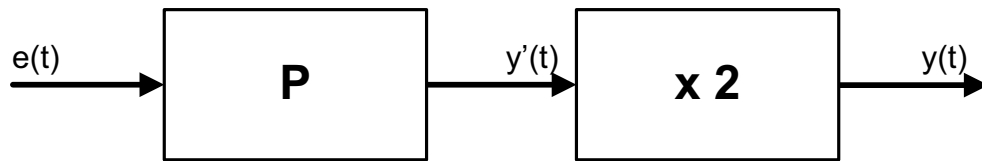


Abbildung 4-12: Blockschaltbild P-Regler mit 2 Pumpen

Aus dem Übertragungsverhalten ergibt sich:

$$\frac{y(t)}{e(t)} = K_p$$

$$2 * \frac{y'(t)}{e(t)} = K_p$$

$$\frac{y'(t)}{e(t)} = \frac{K_p}{2}$$

Der P-Anteil muss bei Einsatz von 2 Pumpen mit identischer Leistung halbiert werden.

Analog zu dieser Formel können für weitere Pumpenkonstellationen die Verstärkung  $K_P$  berechnet werden.

$$K = K_p * \frac{P_v}{P_e}$$

$K$  Errechneter  $K_P$

$K_P$  Eingestellter  $K_P$  für Pumpe 1

$P_v$  Gesamtleistung des Pumpenverbunds

$P_e$  Pumpenleistung der Pumpe 1

### Errechnete Proportionalwerte:

#### Identische Pumpen:

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	100%	100%	100%	100%
Gesamtleistung	100%	200%	300%	400%	500%
Eingestellter $K_p$	1				
<b><math>K_p</math> berechnet</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,33</b>	<b>0,25</b>	<b>0,2</b>

**Tabelle 4-7: Berechnung des P-Anteils für identische Pumpen**

#### Pumpen mit unterschiedlichen Leistungen:

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	50%	100%	25%	50%
Gesamtleistung	100%	150%	250%	275%	325%
Eingestellter $K_p$	1				
<b><math>K_p</math> berechnet</b>	<b>1</b>	<b>0,67</b>	<b>0,40</b>	<b>0,36</b>	<b>0,31</b>

**Tabelle 4-8: Berechnung des P-Anteils für unterschiedliche Pumpen**

### I-Anteil



**Abbildung 4-13: Blockschaltbild I-Regler**

Zum Ausgleich der dauerhaften Regelabweichung eines P-Reglers kann ein Integralanteil (I-Regler) zugeschaltet werden. Der Integral-Anteil ergibt sich aus dem zeitlichen Integral der Reglerabweichung. Der Integral-Anteil verschwindet, wenn keine Reglerabweichung mehr vorhanden ist.

Übergangsverhalten eines I-Reglers:

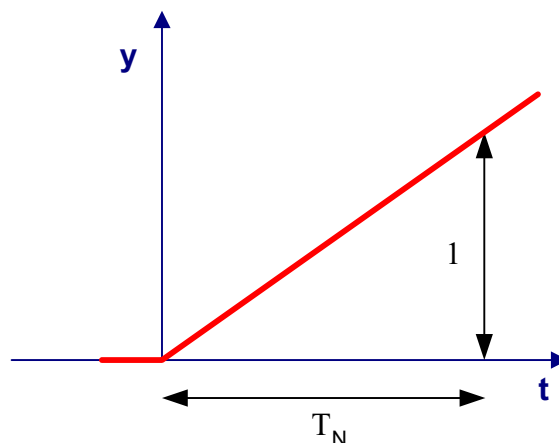
$$y(t) = \frac{1}{T_N} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

$y(t)$  Ausgangssignal / Stellgröße

$e(t)$  Eingangssignal

$T_N$  Nachstellzeit

### Sprungantwort



**Abbildung 4-14: Sprungantwort I-Regler**

Bei einer konstanten Regler-Differenz erreicht der Stellwert den Eingangswert nach  $T_N$ . Der Stellwert steigt weiter bis zur maximalen Begrenzung des Regler-Ausgangs.

### I- Regler mit Regelstrecke (2 Pumpen)

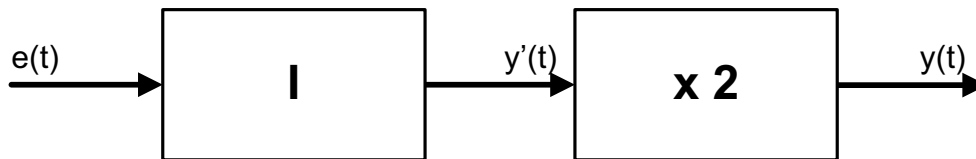


Abbildung 4-15: Blockschaltbild I-Regler mit 2 Pumpen

### Sprungantwort des Systems

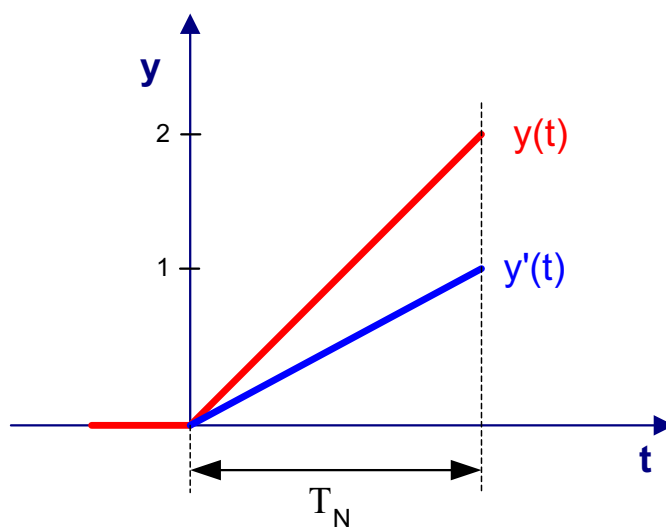


Abbildung 4-16: Sprungantwort I-Regler mit 2 Pumpen

Auf Grund der Grafik kann folgende Formel angewendet werden.

$$y(t) = 2 * y'(t)$$

Damit das Ausgangssignal der Schaltung I-Regler und Pumpensystem (Abbildung 23) identisch mit dem Ausgangssignal des reinen I-Reglers (Abbildung 22) ist, muss die Zeit  $T_N$  angepasst werden.  $y(t)$  verdoppelt sich auf Grund der Erhöhung der Pumpenleistung. Wird die Zeit  $T_N$  des I-Anteils auf  $2 * T_N$  erhöht, ist das Ausgangssignal identisch mit der Sprungantwort des reinen I-Reglers.

## Errechnete Nachstellzeiten:

### Identische Pumpen:

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	100%	100%	100%	100%
Gesamtleistung	100%	200%	300%	400%	500%
Eingestellter $T_N$	2				
<b><math>T_N</math> berechnet</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>

**Tabelle 4-9: Berechnung des I-Anteils für identische Pumpen**

### Pumpen mit unterschiedlichen Leistungen:

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	50%	100%	25%	50%
Gesamtleistung	100%	150%	250%	275%	325%
Eingestellter $T_N$	2				
<b><math>T_N</math> berechnet</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5,5</b>	<b>6,5</b>

**Tabelle 4-10: Berechnung des I-Anteils für unterschiedliche Pumpen**

Werden die beiden Faktoren getrennt betrachtet, ergeben sich folgende Faktoren für ein Pumpensystem mit 2 identischen Pumpen.

$$K_{P2} = \frac{K_{P1}}{2}$$

$$T_{N2} = 2 * T_{N1}$$

$K_P, T_N$  Faktoren für eine Pumpe

$K_{P2}, T_{N2}$  Faktoren für 2 identische Pumpen

## PID-Regler (Siemens FB 41 "CONT C")

Serienschaltung: P-Anteil wirkt bei I- und D-Anteil.

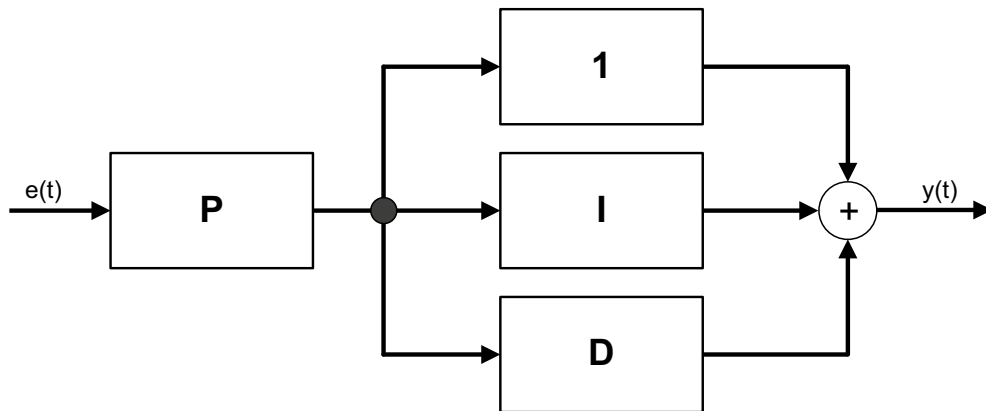


Abbildung 4-17: Blockschaltbild PID-Regler

$K_P$  Verstärkung

$T_N$  Nachlaufzeit

$K_d$  Differentialanteil

Differentialgleichung:

$$y(t) = K_P * \left( e(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d * \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Reglerparameter für die Testkonfiguration

Pumpe	1	2	3	4	5
Pumpenleistung je Pumpe	100%	100%	100%	100%	100%
Gesamtleistung	100%	200%	300%	400%	500%
Eingestellter $K_p$	4				
$K_p$ berechnet		2	1,3333	1	0,8
Eingestellter $T_N$	0,5				
$T_N$ berechnet [s]		1	1,5	2	2,5

Tabelle 4-11: Reglerparameter für den Siemens-Regler CONT\_C

#### 4.2.4 Simulation des Regelkreises

Für den Simulationsaufbau habe ich eine Regelung des Behälterfüllstandes gewählt, durch den proportionalen Zusammenhang zwischen Füllstand und Eingangsdruckstand ist die Regelstrecke annähernd identisch mit einer MPP-Anlage.

##### Aufbau

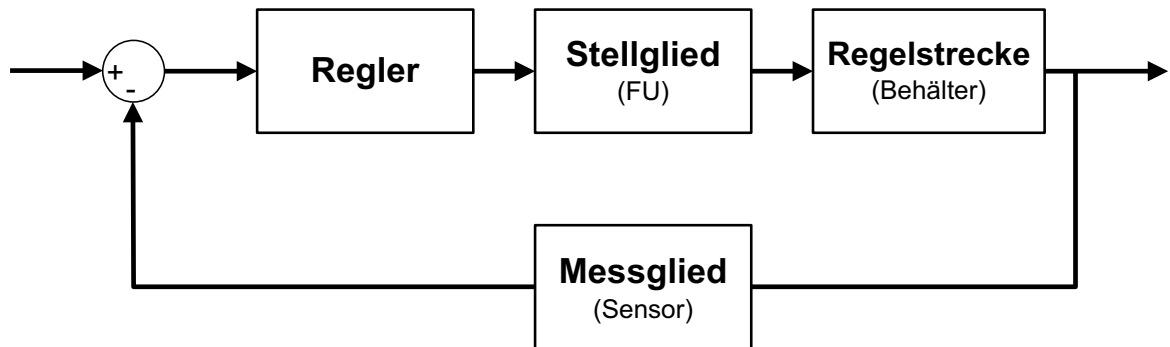


Abbildung 4-18: Regelkreis mit PID-Regler

Die Simulation des Reglers wurde mit dem TIA-Portal V11 der Firma Siemens durchgeführt.

Die Teile des Regelkreises sind als eigenständige Bausteine programmiert und wurden einzeln getestet.

Regler	Standard FB der S7-300 (FB42 CONT_C)
Stellglied (FU)	Der FU ist als Rampenfunktion realisiert, die Hochlaufzeit kann frei konfiguriert werden. Bei diesen Tests wird eine Hochlaufzeit von 5s von 0 auf 100% eingestellt.
Regelstrecke	Im Baustein für den Behälter sind die Funktionen Initialwert, Zulauf in l/min und Abfluss mit den Parametern Pumpendrehzahl [%] / Durchfluß bei 100% Drehzahl [l/min].
Sensor	Für die Simulation wurde der Drucksensor 3051T mit einer Verzögerung von 100ms, verwendet.

Der Aufruf aller Bausteine erfolgt im OB35 (eingestellt auf 100ms Zeit OB), das gewährleistet einen Bausteinaufruf unabhängig von der Zykluszeit des restlichen Programmes.

Das Programm läuft als Simulator des TIA-Portals, dadurch ist keine Steuerungshardware erforderlich. Die Visualisierung der Reglerfunktionen wird mit dem integrierten PID-Tool durchgeführt, es greift direkt auf den Instanz-DB des PID-Bausteins zu.

Eine minimale zeitliche Auflösung von 0.3s kann mit dem Visualisierungstool erreicht werden, für die Anzeige des Soll-, Ist- und Stellwertes ist diese Auflösung ausreichend.



## Testkonfiguration 1

### Ausgangssituation

- Förderleistung einer Pumpe bei 100% Drehzahl 500l/min
- Hochlaufzeit 5 s / 0 – 100%
- Füllstand des Tanks 200 l
- Sollwert 50 l

### Test 1

$K_P$	-4.0
$T_N$	500ms
Anzahl Pumpen	1

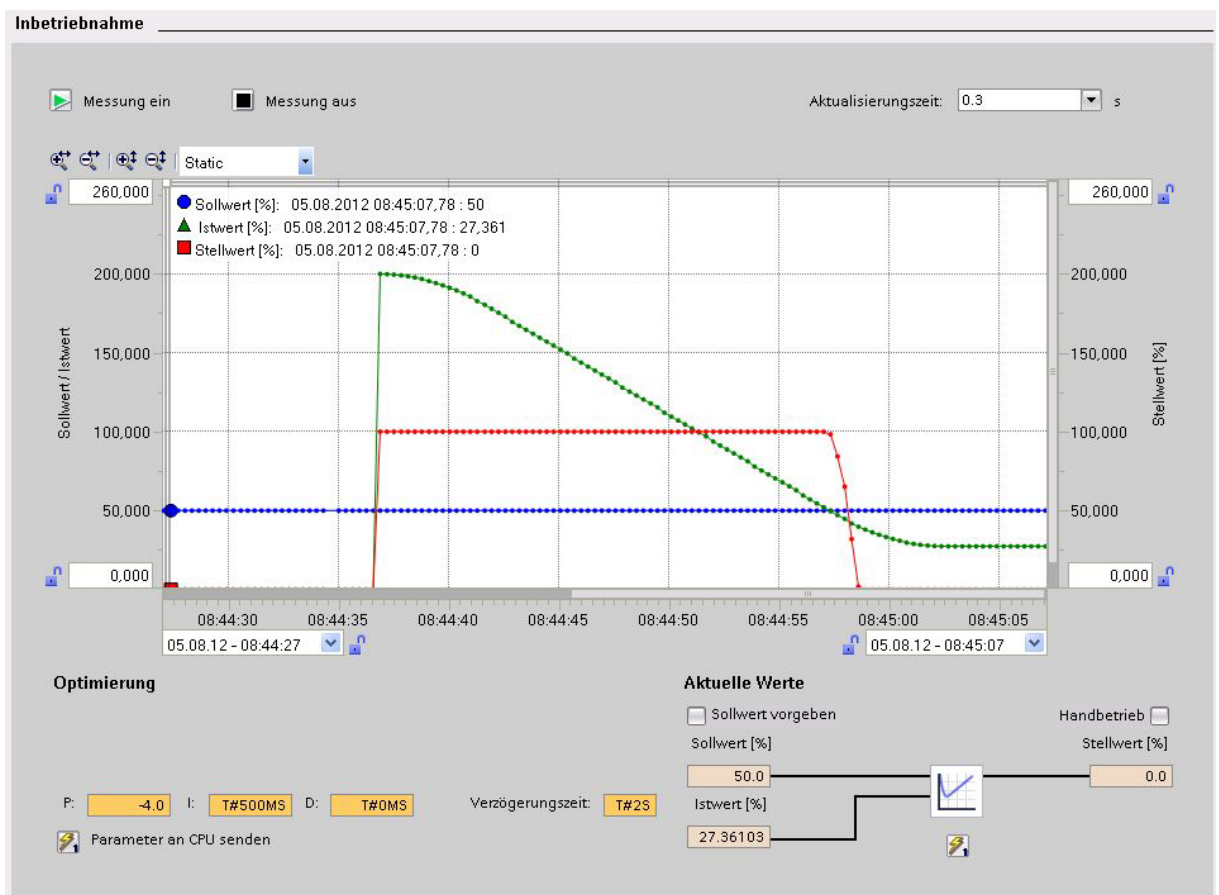


Abbildung 4-19: PID Diagramm TIA-Portal 1 Pumpe

Mit dem integrierten Tool PID-Inbetriebnahme des TIA-Portals lassen sich alle relevanten Daten aufzeichnen. Der angenommene Behälter wird bei dieser Testkonfiguration nicht nachgefüllt, durch die Regelstrecke und die Verzögerung des Sensors ergibt sich ein Überschwingen von ca. 22,7l.

## Test 2

$K_P$  -2.0  
 $T_N$  1000ms  
Anzahl Pumpen 2



Abbildung 4-20: Diagramm 2 Pumpen mit Regleranpassung

## Test 3

$K_P$  -0.8  
 $T_N$  2500ms  
Anzahl Pumpen 5

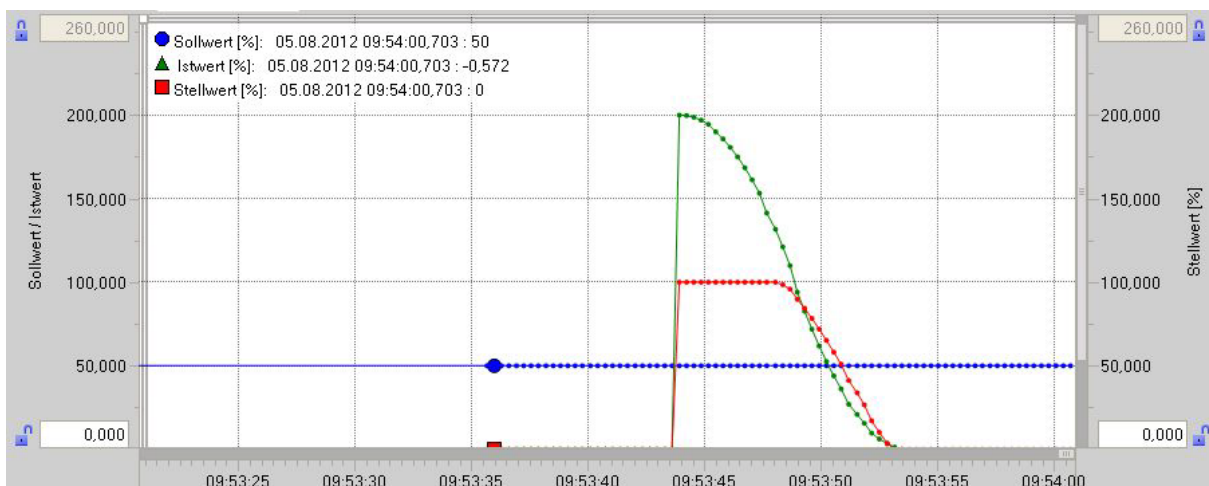


Abbildung 4-21: Diagramm 5 Pumpen mit Regleranpassung

## Test 4

$K_P$	-4
$T_N$	500ms
Anzahl Pumpen	5



Abbildung 4-22: Diagramm 5 Pumpen ohne Regleranpassung

Im Test 4 wird keine Regleranpassung vorgenommen und bei Test 3 werden die errechneten Werte verwendet. Der Regler bei Test 4 reagiert bei Änderung der Reglerdifferenz sehr schnell, bei Anpassung der Parameter ist die Reaktion deutlich langsamer – der Regler benötigt weitaus mehr Zeit bis zur Sollwertvorgabe „0“.

Erfolgt keine Anpassung der Reglerparameter, reagiert der Regler viel zu schnell. Bei diesem Beispiel ergibt sich ein Istwert von -62,5 bei Drehzahl = 0, mit Regleranpassung stellt sich ein Wert von nur -0,572 ein.

Bei Schwankungen des Istwertes würde der nicht angepasste Regler zu schnell reagieren und wäre dadurch deutlich unruhiger.

## Testkonfiguration 2

Mit dieser Simulation soll die Reaktion auf einen variierenden Zulauf zum Behälter getestet werden. Die Tests werden mit je einem Pumpenverbund mit 1, 3 und 5 Pumpen durchgeführt. Die Pumpenleistung einer Pumpe ist 80% des maximalen Zuflusses.

## Ausgangssituation

- Förderleistung einer Pumpe bei 100% Drehzahl 500 l/min
- Füllstand des Tanks 100 l
- Sollwert 50 l
- Zulauf zum Behälter 200 l für 50s, Rampe  $\pm 50$  l/s  
400 l für 50s, Rampe  $\pm 50$  l/s

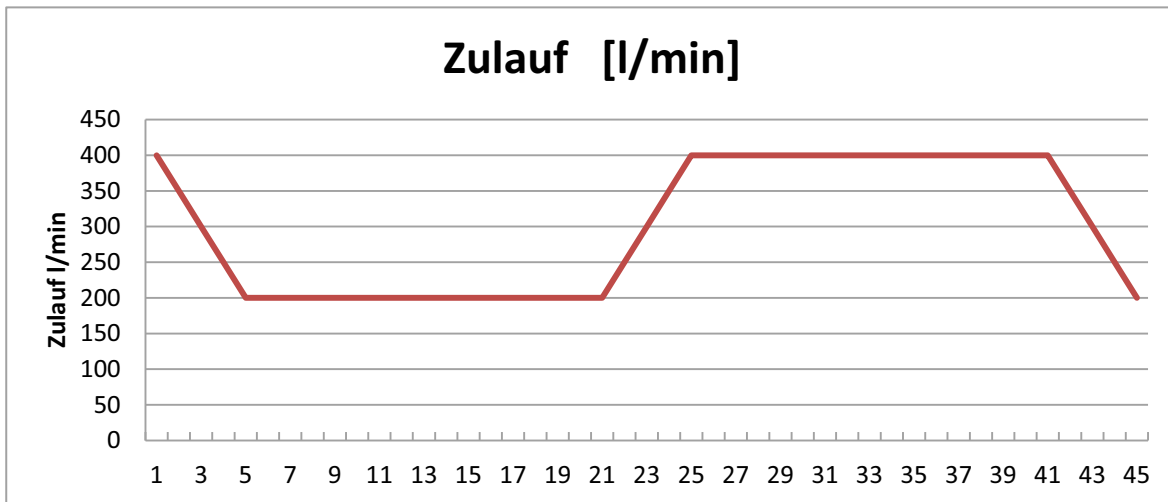


Abbildung 4-23: Zulauf Behälter Testkonfiguration 2

## Test 1

$K_P$  -4.0

$T_N$  500ms

Anzahl Pumpen 1

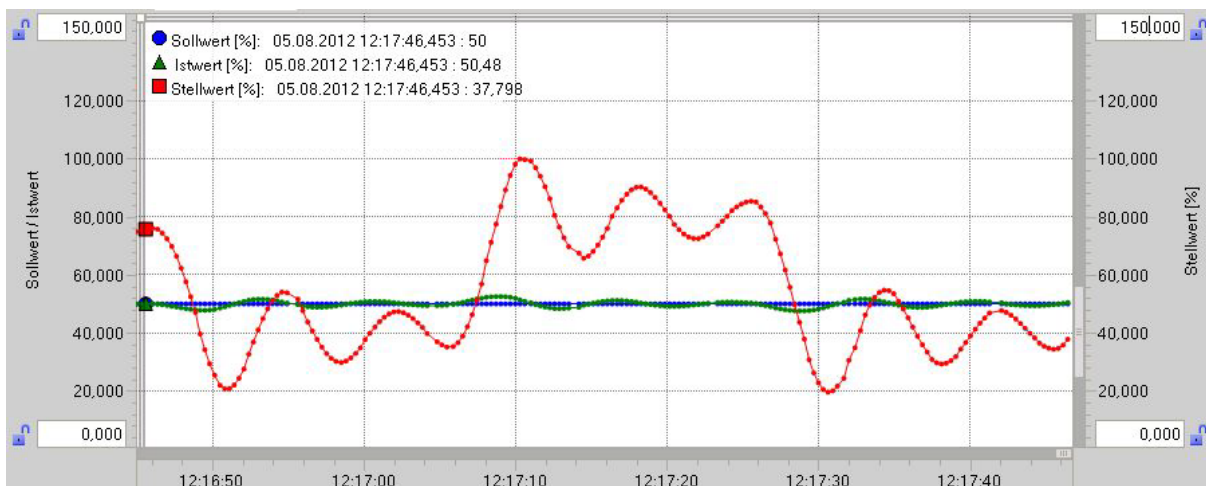


Abbildung 4-24: Diagramm 1 Pumpe Testkonfiguration 2

Der Regler reagiert schnell und hält den Füllstand des Behälters relativ konstant. Durch das Verhältnis zwischen Zulauf- und Fördermenge der Pumpe muss der Regler weit ausregeln.

## Test 2

$K_P$  -1,33

$T_N$  1500ms

Anzahl Pumpen 3

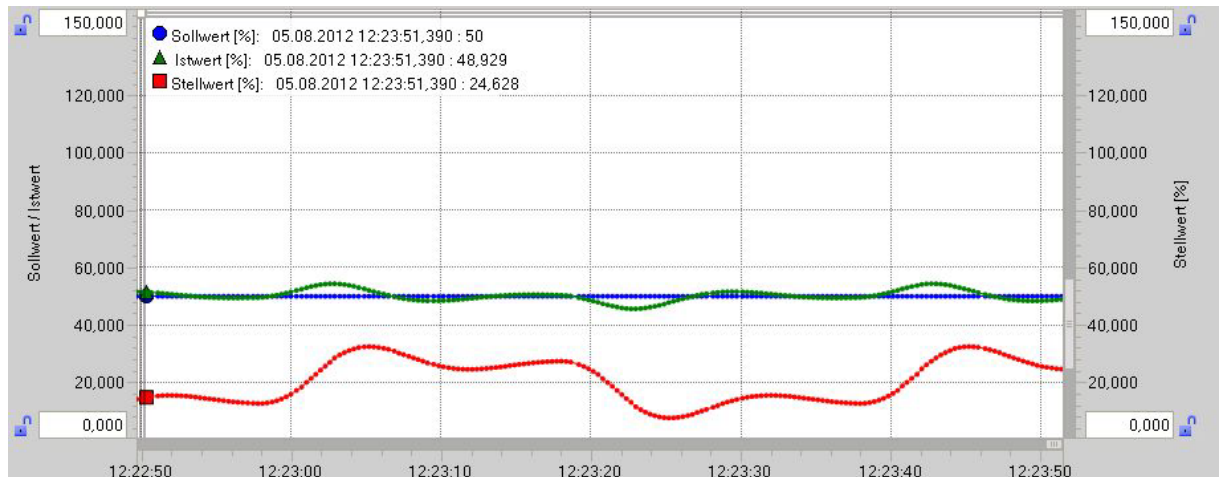


Abbildung 4-25: Diagramm 3 Pumpen Testkonfiguration 2

## Test 3

$K_P$  -0,8

$T_N$  2500ms

Anzahl Pumpen 5

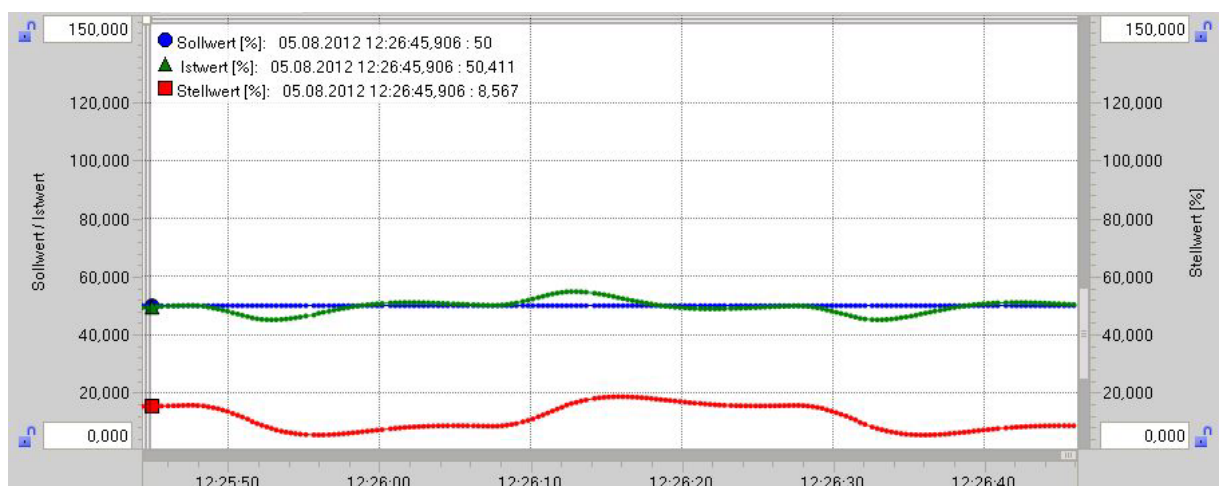


Abbildung 4-26: Diagramm 5 Pumpen Testkonfiguration 2

Bei diesem Test mit 3 und 5 Pumpen ist die Änderung des Füllstandes im Bezug zur maximalen Förderleistung gering. Das Überschwingen ist größer als bei 1 Pumpe, aber gleich groß bei 3 und 5 Pumpen.

### Testkonfiguration 3

Bei dieser Simulation wird bei laufender Regelung ein Druckstoß simuliert. Der Behälterfüllstand wird mit einem 200ms Impuls auf 200l erhöht und danach wieder auf den ursprünglichen Wert zurückgesetzt.

#### Ausgangssituation

- Förderleistung einer Pumpe bei 100% Drehzahl 500 l/min
- Füllstand des Tanks 100 l
- Sollwert 50 l
- Zulauf zum Behälter 200 l für 20s, Rampe  $\pm 50$  l/s  
400 l für 20s, Rampe  $\pm 50$  l/s

#### Test 1

$K_P$  -4

$T_N$  500ms

Anzahl Pumpen 1

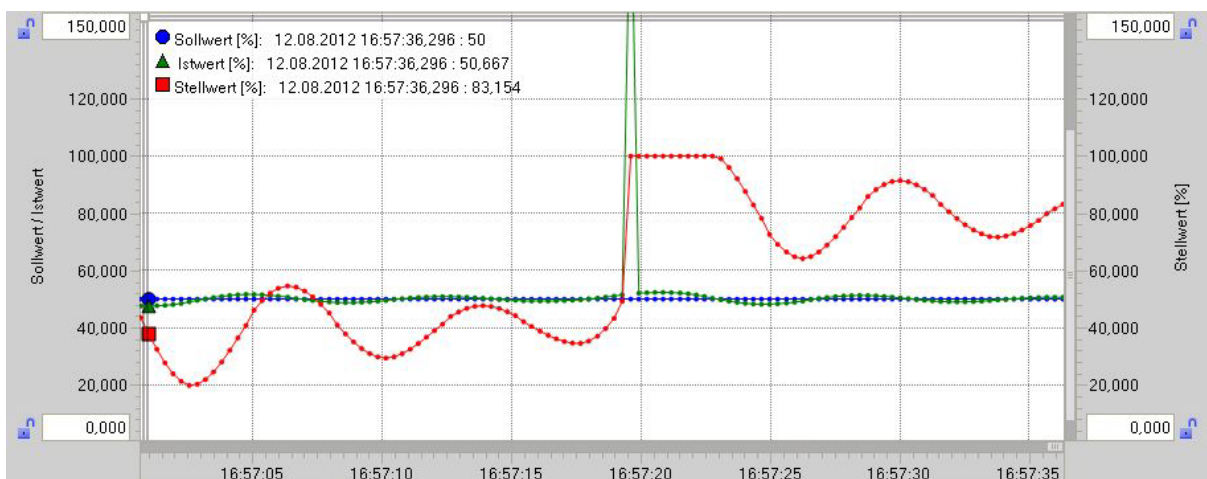


Abbildung 4-27: Diagramm eine Pumpe Testkonfiguration 3

Der 200ms Impuls bewirkt eine Sollwerterhöhung, auf Grund der Hochlauframpe des Frequenzumrichters (5s von 0 auf 100%) hat sie jedoch nur einen geringen Einfluss.



## Test 2

$K_P$  -1,33

$T_N$  1500ms

Anzahl Pumpen 3

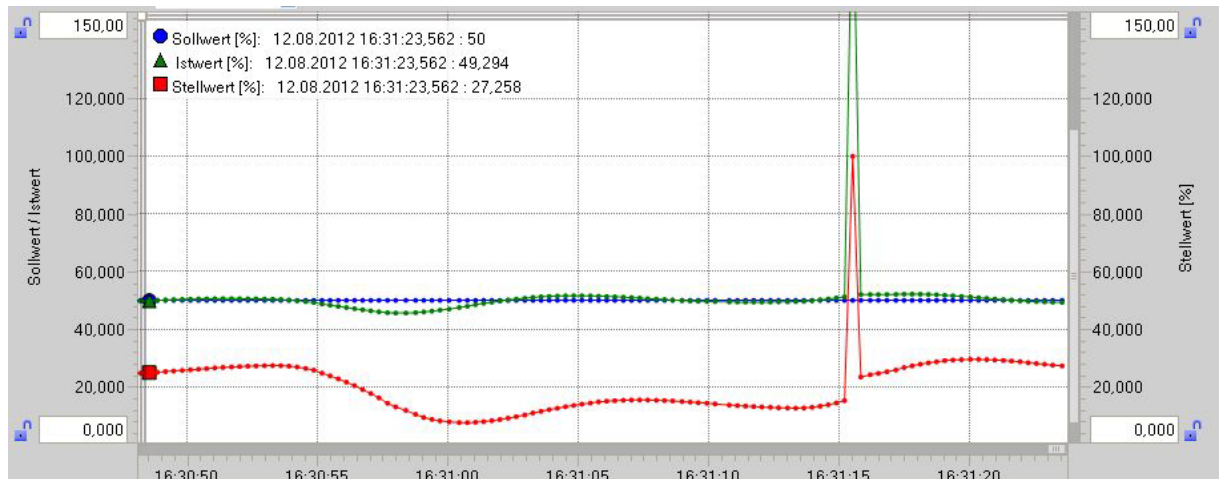


Abbildung 4-28: Diagramm 4 Pumpen Testkonfiguration 3

## Test 3

$K_P$  -0,8

$T_N$  2500ms

Anzahl Pumpen 5

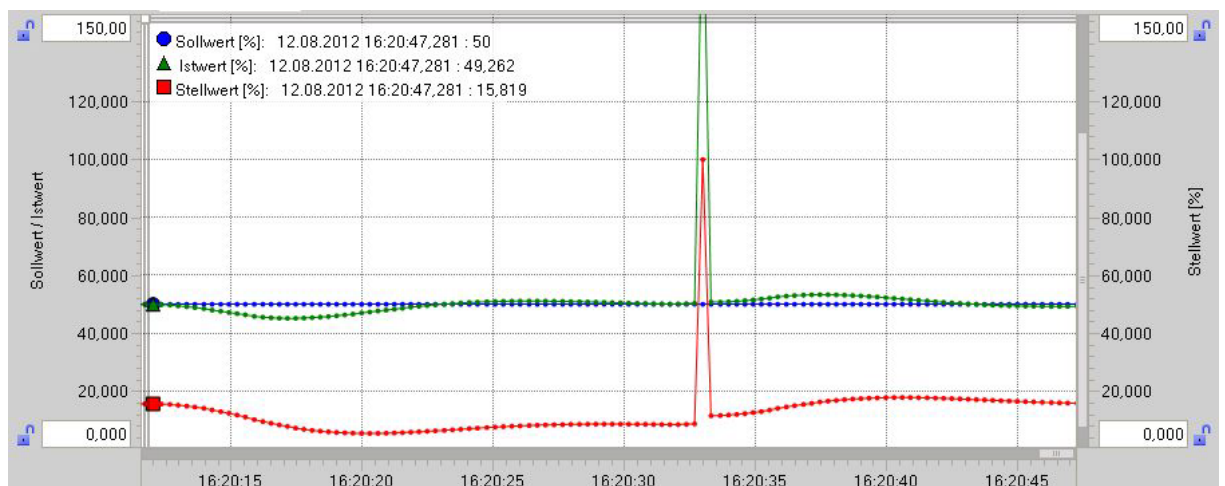


Abbildung 4-29: Diagramm 5 Pumpen Testkonfiguration 3

Analog zu der Simulation mit 1 Pumpe, hat auch bei 3 und 5 Pumpen mit Anpassung der Reglerparameter der Impuls keine große Auswirkung. Die Drehzahl wird nur für ca. 0,6 Sekunden erhöht, d. h. die Drehzahl kann maximal um 12% (5s von 0 auf 100%) angehoben sein.

## Test 4

$K_P$  -4

$T_N$  500ms

Anzahl Pumpen 5

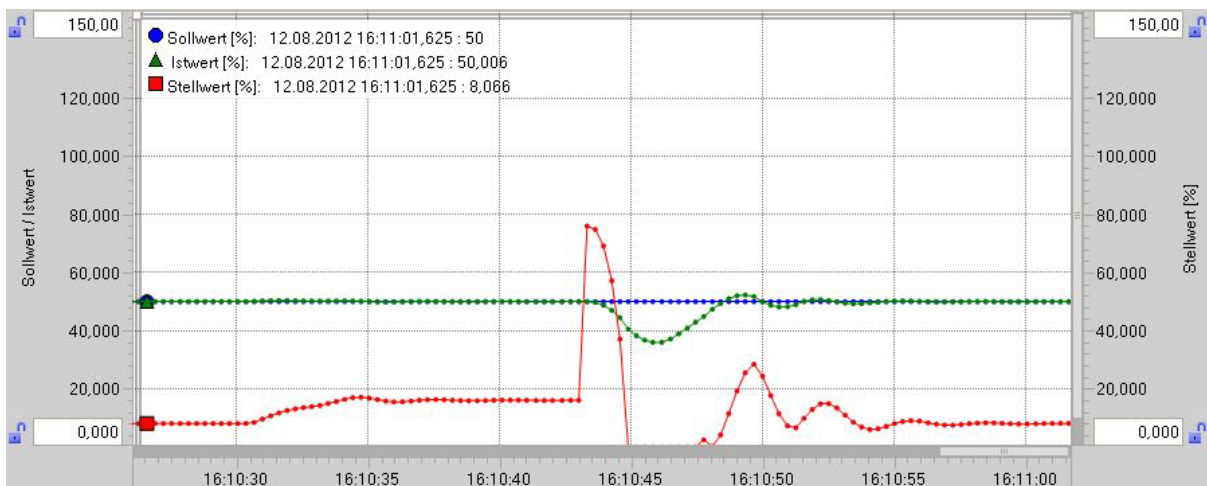


Abbildung 4-30: Diagramm 5 Pumpen ohne Regleranpassung

Werden die Reglerparameter nicht angepasst, ist die Auswirkung des Impulses stärker. Der Sollwert benötigt 10 Sekunden bis zum ursprünglichen Zustand. Die Anlage mit 5 Pumpen läuft mit den angepassten Werten für  $K_P$  und  $T_N$  deutlich ruhiger.



## 4.2.5 Programmiermodell

### Ansteuerung der Pumpen:

Die Zuschaltung der Pumpen wird mit einem Zähler abgebildet, je nach Zählerstand wird die entsprechende Anzahl an Pumpen angesteuert. Ist der Zähler = 1 wird die erste Pumpe zusätzlich gestartet oder bei bereits 2 zusätzlich laufenden Pumpen die Pumpe 2 abgeschaltet.

Nach jeder Zu- oder Abschaltung einer Pumpe müssen die Reglerparameter angepasst werden. Bei Start einer zusätzlichen Pumpe wird diese langsam hochgefahren, bei gleicher Drehzahl aller Pumpen wird der Reglersollwert auch auf die zusätzliche Pumpe geschaltet. Wird der Sollwert auf die Pumpe aufgeschaltet, müssen auch die neuen Reglerparameter am PID-Regler anliegen.

### Ablaufdiagramm

Das Ablaufdiagramm von Konzept 1 wird um die Berechnung der Abschaltdrehzahl und die Anpassung der Reglerparameter, bei Inkrementieren oder Dekrementieren des Zählers, erweitert.

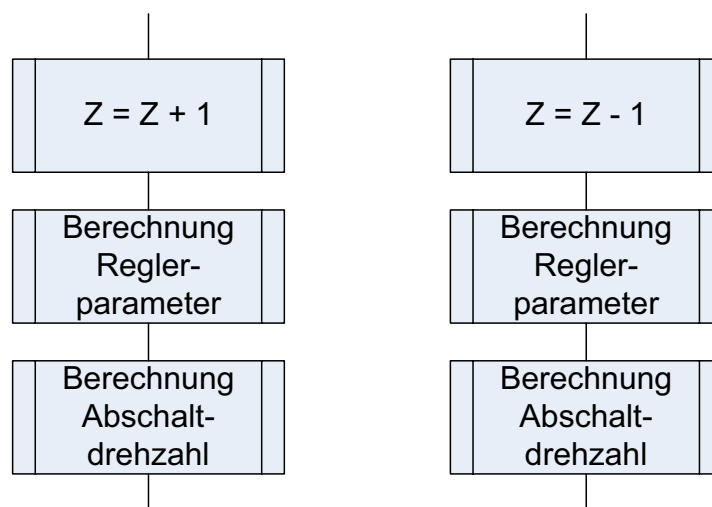


Abbildung 4-31: Erweiterung Ablaufdiagramm für Konzept 2

#### **4.2.6 Fazit Konzept 2:**

Das Konzept 2 ermöglicht die Zusammenschaltung von Pumpen unterschiedlicher Leistungen. Die Anpassung der Zu- und Abschaltreihenfolge sowie die Regler-Anpassung erfordern einen erhöhten Programmier- und Inbetriebnahme-Aufwand. Eine Inbetriebnahme erfordert für den Praxistest eine einstellbare Fördermenge, damit die möglichen Pumpenkonstellationen getestet werden können.

##### **Vorteile**

- + Zuschaltung unabhängig von der Pumpengröße möglich
- + Priorisierte Zuschaltung von Pumpen (z.B. abhängig von den Betriebsstunden)

##### **Nachteile**

- Anpassung der Regler-Parameter online erforderlich
- Keine optimale Nutzung der Pumpen möglich (optimaler Betriebspunkt)
- Abschaltung nach Pumpengröße um Regelbereich zu maximieren

## 4.3 Konzept 3 – Energieoptimierte Regelung

Durch steigenden Energiepreise ist die Betrachtung einer energieoptimierten Steuerung notwendig.

Für die Umsetzung müssen alle Komponenten der Anlage betrachtet werden:

- Frequenzumrichter
- Motor
- Mehrphasenpumpe

Die Zusatzaggregate werden bei dieser Analyse nicht betrachtet, da die Pumpen des Seal / Lube-Oil Systems ohne Drehzahlregelung betrieben werden und immer benötigt werden.

Die Antriebsleistung der Mehrphasenpumpe hängt vom Differenzdruck (Pipelinebeschaffenheit) ab. Diese Komponente kann vom Bediener nicht beeinflusst werden. Dadurch kann die Leistung nur anhand der Drehzahlvorgabe der einzelnen Pumpen optimiert werden.

### 4.3.1 Frequenzumrichter:

In den Dokumentationen der bereits verwendeten Frequenzumrichter konnte kein Diagramm für den Wirkungsgrad im Bezug auf die Antriebsleistung gefunden werden. Der Wirkungsgrad wird in den Beschreibungen mit 95% angegeben.

### 4.3.2 Motor:

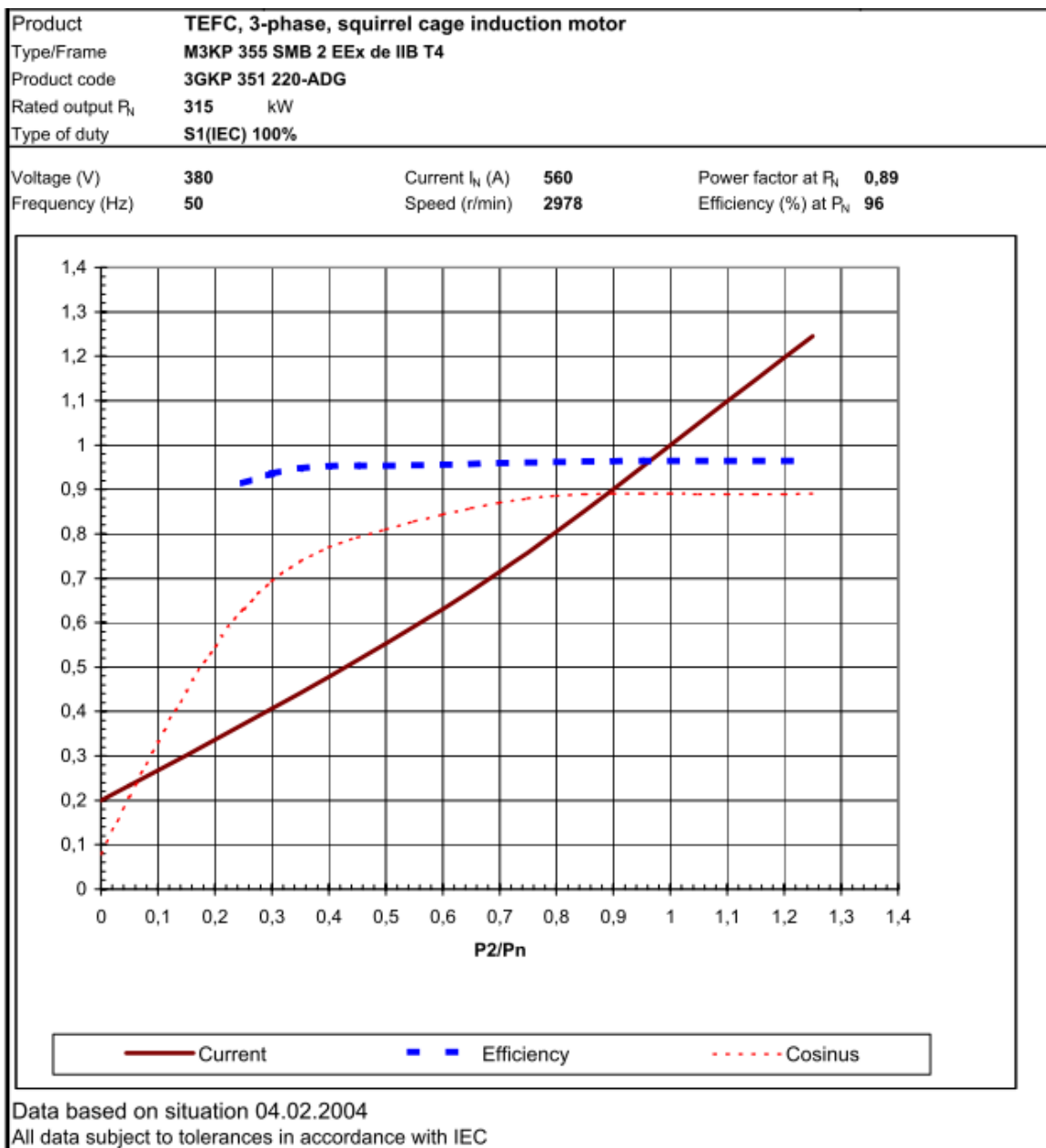
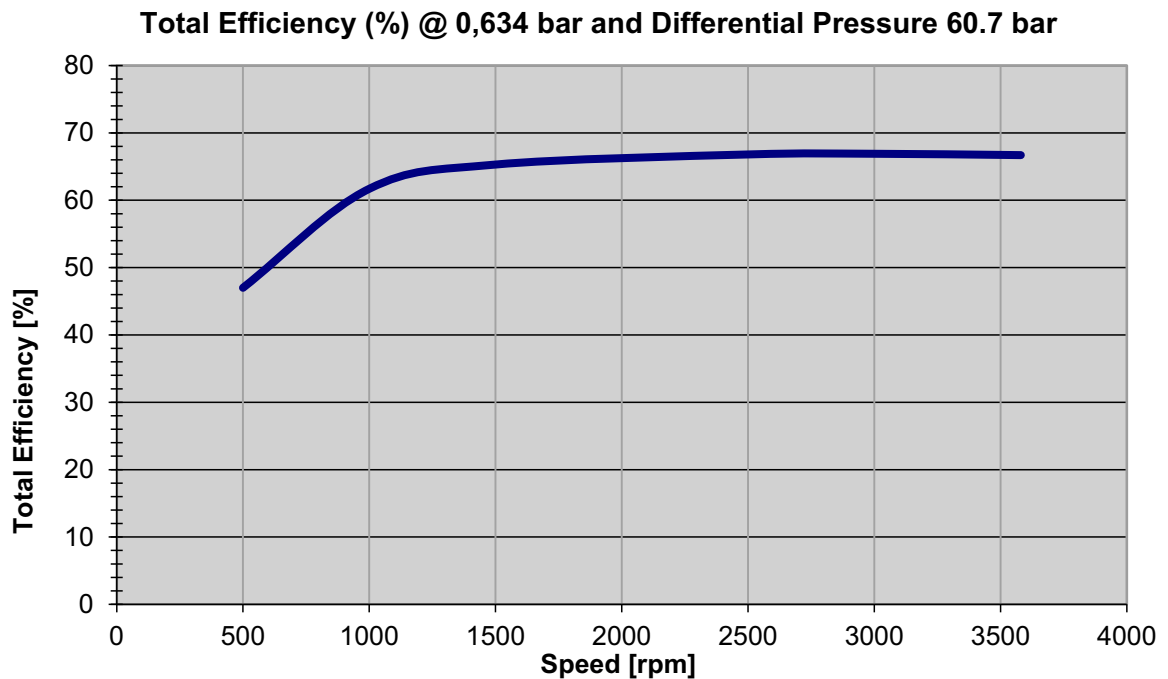


Abbildung 4-32: Kennlinien Motor 315kW [LeiP2012]

Der Wirkungsgrad ist bei dieser Pumpe ab ca. 35% der Nennleistung annähernd konstant. Da die Pumpenleistung primär vom Differenzdruck und der Drehzahl abhängt, aber nur die Pumpendrehzahl beeinflusst werden kann, wird die Optimierung nur über die Drehzahl erfolgen.

### 4.3.3 Mehrphasenpumpe

Die Wirkungsgradkennlinie muss für jede Pumpe neu analysiert werden. Es wird für die Betrachtung die Kennlinie einer aktuellen Pumpe verwendet, mit den Parametern Eingangsdruck 634mPas und einem Differenzdruck von 60,7 bar

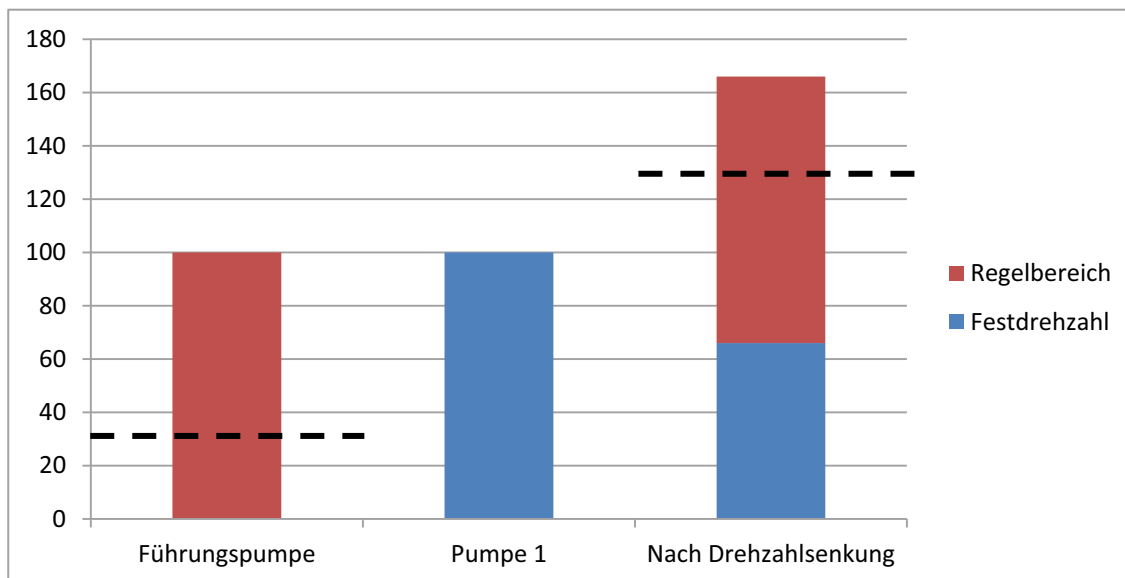


**Abbildung 4-33: Wirkungsgrad-Kennlinien MPP (L4HG 150 – 030) [LeiP2012]**

Diese Wirkungsgradkennlinie ist nur für die angegebenen Werte (Eingangs- und Differenzdruck) gültig. Der generelle Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Drehzahl – niedrige Drehzahl = niedriger Wirkungsgrad, hohe Drehzahl = hoher Wirkungsgrad - kann für alle Verhältnisse angenommen werden.

Analog zu der Motorkennlinie kann eine Beeinflussung des Wirkungsgrades nur über die Drehzahl erfolgen.

Bei Konzept 1 ergibt sich ein guter Pumpenwirkungsgrad bei den Festdrehzahlen 50 und 100%. Eine Optimierungsmöglichkeit wäre die Erweiterung der Festdrehzahlen von 50/100% auf 33/66/100%, damit würde auch bei einer Abschaltdrehzahl von 33% der Führungspumpe ein besserer Wirkungsgrad erreicht.



**Abbildung 4-34: Konzept 3 Drehzahlsenkung um 33% Leistung**

In diesem Diagramm wird der mögliche Regelbereich bei aktuell 33% Drehzahl der Führungspumpe, vor und nach der Drehzahlsenkung von Pumpe 1, dargestellt. Vor der Drehzahlsenkung ist der Regelbereich nach unten nur 33% und nach oben der Rest (67%), nachher ist es umgekehrt.

#### 4.3.4 Fazit

Für die Regelung eines Mehrphasenpumpen-Verbunds kann kein in der Praxis anwendbares Konzept zur Energieoptimierung ermittelt werden. Daher muss bei der Pumpenauslegung dieser Systeme, Anzahl und Größe der Pumpen das Augenmerk auf die Auslastung gelegt werden.

# 5 Umsetzungsmöglichkeiten der Konzepte

## 5.1 Steuerungsauswahl

Zur Auswahl der CPU werden folgende Voraussetzungen definiert:

- Leistung für mind. 5 Pumpensteuerungen
- Profibus zur Anbindung von Remote IOs (ET200) und Frequenzumrichtern
- Ethernet-Modul zur Anbindung von Bedienpanel (HMI) oder Leitystemen
- Möglichkeit der Kopplung mit MODBUS RTU oder TCP
- Kostengünstig
- Modularer Aufbau / Erweiterbarkeit

### 5.1.1 Version 1 – eine CPU je Pumpe (S7-300)

Jede Pumpe wird als eigenständiges System ausgelegt, bestehend aus einer Siemens CPU 315-2DP, Ethernet-CP und Peripherie. Alle Einzelsysteme, das HMI und das SCADA System kommunizieren über Ethernet.

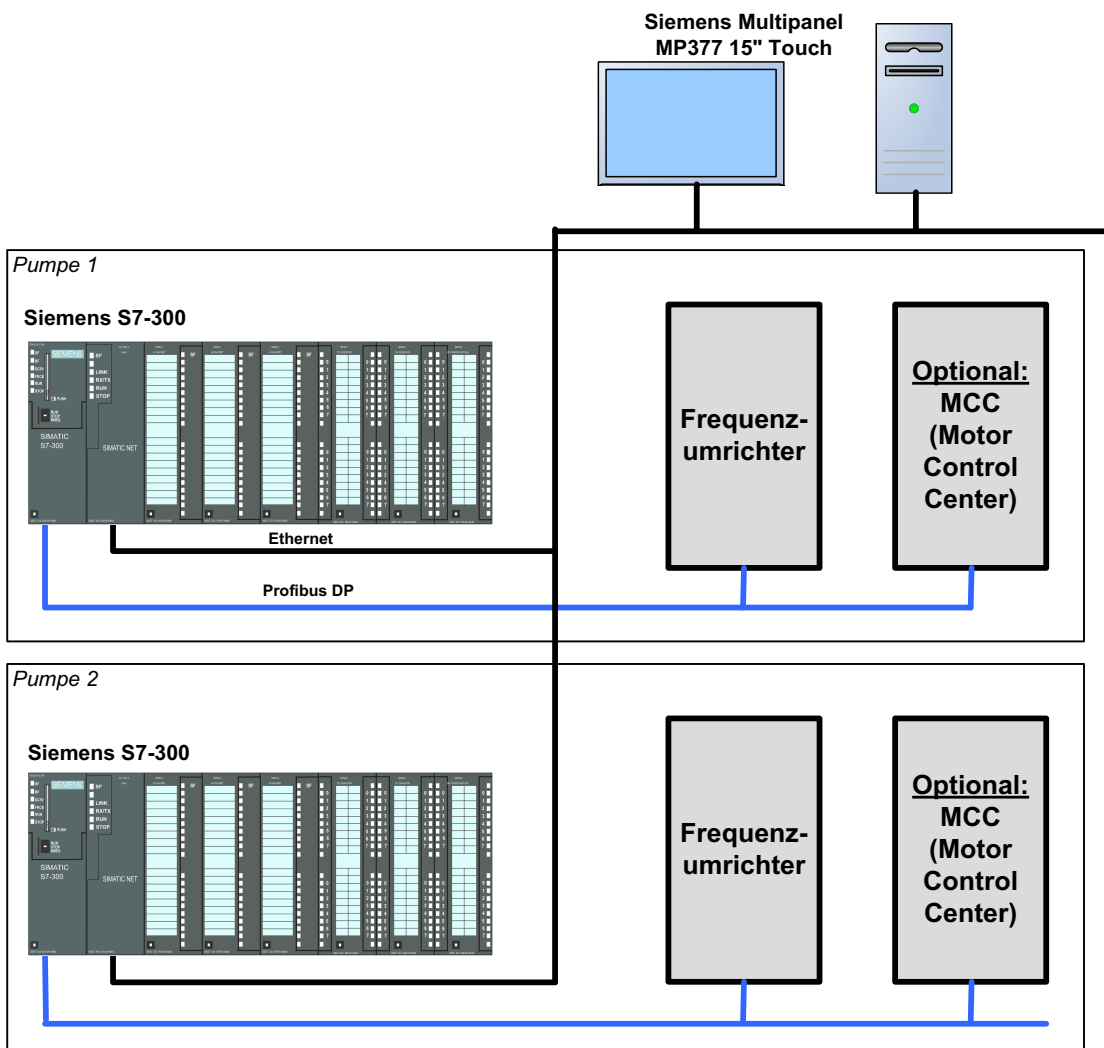


Abbildung 5-1: Steuerungsaufbau mit Einzelsystemen [SiSp2012]

#### Vorteile

- + Identischer elektrischer Aufbau aller Pumpen
- + Splitten in Einzelanlagen
- + Je Pumpe ein Steuerschrank
- + Pumpen funktionieren unabhängig voneinander
- + Ersatzteilkhaltung

#### Nachteile

- Programmieraufwand für Datenkommunikation zwischen den Anlagen



### 5.1.2 Version 2 – eine CPU je Pumpenverbund (S7-300)

Die erste Pumpe wird mit einer S7-300 CPU (z.B. CPU 317-2DP) und einem Ethernet CP ausgestattet.

Das Erweiterungsrack wird als ET200M ausgeführt und wird analog zum Zentralrack aufgebaut. Die Baugruppen können auf Module gesetzt werden, die die Möglichkeit des Ziehens und Steckens unter Spannung bieten. Mittels Profibus wird die ET200M an das Mastersystem angebunden und die Visualisierung erfolgt über ein Siemens Multipanel MP377 15“.

#### Schematischer Steuerungsaufbau:

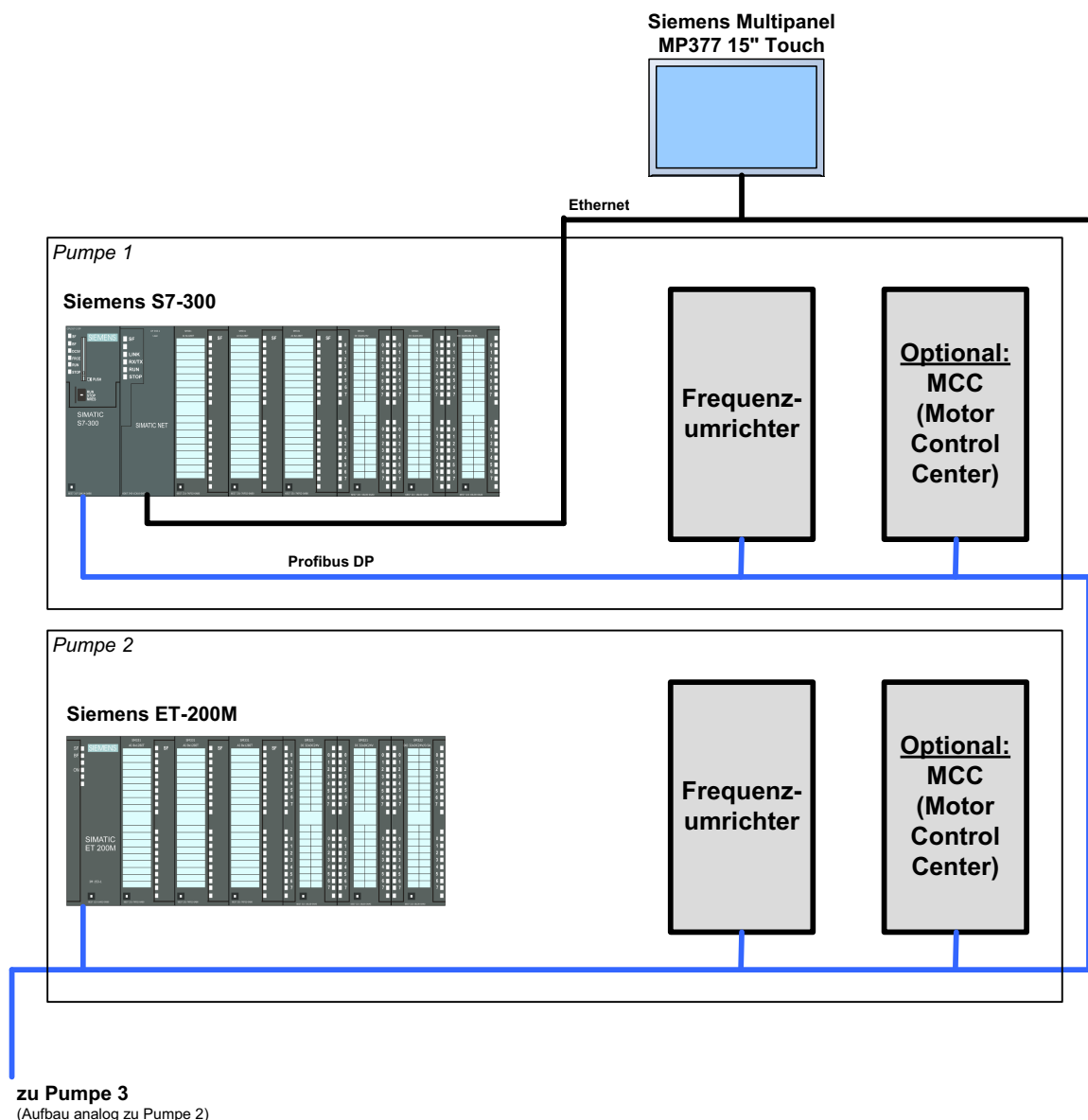


Abbildung 5-2: Steuerungsaufbau S7-300 mit ET200M [SiSp2012]

## **Vorteile**

- + Identischer elektrischer Aufbau aller Pumpen (Pumpe 1 ausgenommen)
- + Je Pumpe ein Steuerschrank
- + Programm für alle Pumpen läuft auf einer CPU – keine Datenkommunikation
- + Splitten in Einzelanlagen durch Tausch der ET200M Anschaltung mit einer S7-300 CPU möglich (Programm muss abgeändert werden)

## **Nachteile**

- Ausfall der CPU betrifft die gesamte Anlage
- Programmänderung bei Splitten der Anlage

### 5.1.3 Version 3 - eine CPU je Pumpenverbund (S7-400)

Alle Pumpen werden als Profibus Slave (ET200M), analog zu Version 2, ausgeführt und von einer zentralen S7-400 Steuerung angesteuert.

#### Schematischer Steuerungsaufbau:

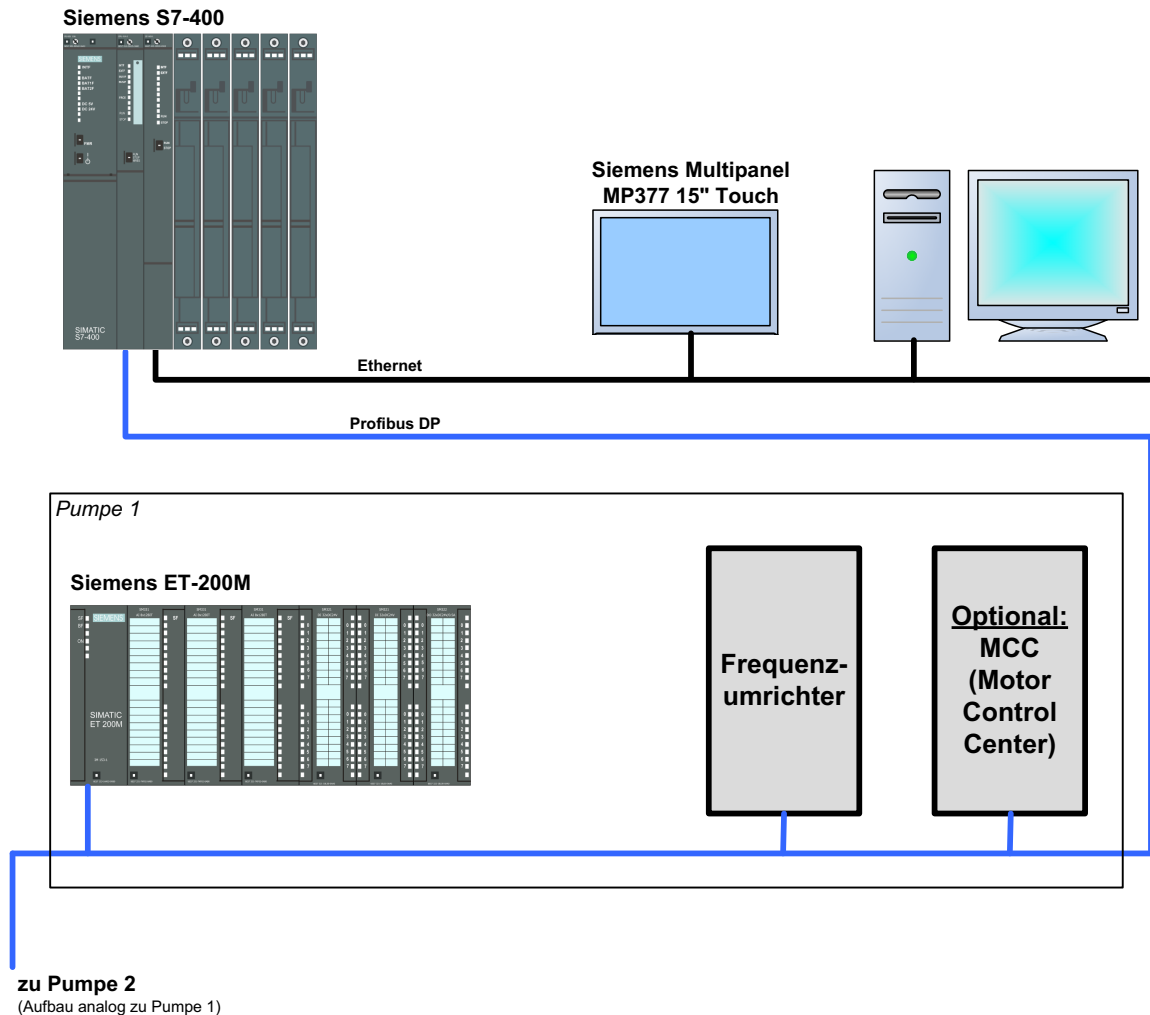


Abbildung 5-3: Steuerungsaufbau S7-400 mit ET200M [SiSp2012]

#### Vorteile

- + Identischer elektrischer Aufbau aller Pumpen
- + Je Pumpe ein Schaltschrank
- + Splitten in Einzelanlagen durch Tausch der ET200M Anschaltung mit einer S7-300 CPU möglich (Programm muss abgeändert werden)
- + Umrüstung auf PCS7 möglich (z.B. mit CPU 416-3 und Aufbau mit IM-153-1 HF)

## Nachteile

- Ausfall der CPU betrifft die gesamte Anlage (ev. Einsatz einer S7-400HF)
- Zusatzschrank für S7-400 Steuerung (Kosten und Platzbedarf)
- Programmänderung bei Splitten der Anlage
- Kosten für S7-400 sehr hoch

### 5.1.4 Kostenvergleich

	Steuerung	zusätzliche Pumpe	Gesamt für 5 Pumpen
Version 1 - je Pumpe eine CPU 315-2DP	5.104,00 €	5.104,00 €	25.520,00 €
Version 2 - Steuerung CPU-317-2DP +ET200M	6.719,00 €	3.120,00 €	19.199,00 €
Version 3 - Steuerung CPU-414-2 +ET200M	8.894,00 €	3.120,00 €	21.374,00 €

**Tabelle 5-1: Kostenaufstellung**

Eine Aufstellung der Komponenten siehe Anhang „Komponentenliste SPS“

Die **Variante 1** mit eigener Steuerung je Pumpe ist die teuerste, zusätzlich muss noch der Programmieraufwand für die Kommunikation untereinander betrachtet werden. Bei dieser Variante kann jede Pumpe eigenständig betrieben werden.

**Variante 2** ist die günstigste und es ist keine Programmierung für die Kommunikation notwendig. Besteht keine Anforderung, dass die Pumpen auf andere Standorte aufgeteilt werden müssen, so ist dieser Aufbau am sinnvollsten. Bei Aufteilung wird die Profibus-Anschaltung gegen eine CPU getauscht und um einen Kommunikationsprozessor erweitert.

Eine S7-400 (**Variante 3**) für die Steuerung der Pumpen ist nicht sinnvoll. Die Steuerung benötigt viel Platz im Schaltschrank und beinhaltet nur die CPU und den Kommunikationsprozessor. Jede Pumpe benötigt zusätzlich eine ET200M. Der Aufbau mit einer S7-300 CPU (analog zu Variante 2) ist nur um 40mm breiter als eine ET200M und die größeren CPUs der S7-300 Serie erreichen die Leistung einer S7-400 CPU.

## 6 Ergebnisse und Ausblick

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Konzepte ergibt sich Folgendes:

Für **Pumpen mit gleicher Leistung** ist das Konzept 1 die sinnvollste Möglichkeit. Alle Reglerparameter werden nur einmal eingestellt und müssen auch bei Zuschaltung von Pumpen nicht angepasst werden. Die Zuschaltung anhand der Betriebsstunden und eine weitgehend konstante Drehzahl bei den Pumpen 2 bis x sind weitere Vorteile. Eine Pumpe sollte als Reserve verwendet werden, wenn eine Pumpe ausfällt oder für Wartungszwecke abgeschaltet wird. Bei sinnvoller Einstellung der Festdrehzahlen (siehe Abbildung 4-34) kann der Wirkungsgrad optimiert werden.

Ein großer Vorteil dieses Konzeptes ist eine einfache Umsetzung in der Steuerung, das Personal für Störungseinsätze muss nur geringe Kenntnisse des Prozesses besitzen, um die Anlage zu betreuen. Je einfacher das Programm umso weniger Störungen treten auf. Ebenso ist der Inbetriebnahme-Aufwand gering, da alle Parameter nur einmal ermittelt werden und danach auf alle Pumpen verteilt werden.

Der **Pumpenverbund** mit mehreren verschiedenen Pumpen / **unterschiedlichen Förderleistungen** ist ein Ausnahmefall. Bei den meisten Anwendungen sind mindestens 2 Pumpen gleich. Für diese Konstellation kann auch das Konzept 1 verwendet werden.

Die Einschränkungen hierfür sind:

- Auswahl der Führungspumpe zur Einstellung der Reglerparameter
- Von der Führungspumpe müssen mind. 2 vorhanden sein, für den Fall eines Ausfalls oder Wartung
- Festlegung der Festdrehzahlen aller restlichen Pumpen

Eine **energieoptimierte Regelung** des Pumpenverbunds ist nicht möglich. Die Leistung hängt zum Großteil von nichtsteuerbaren Faktoren (Differenzdruck) ab. Es ist sinnvoll, die zugeschalteten Pumpen mit einer möglichst hohen Drehzahl zu betreiben, dies ist bei der Festlegung der Führungspumpe und der Festdrehzahlwerte bei unterschiedlichen Pumpen zu beachten.



# Literatur

- [ZaRe2011] Zacher, Serge; Reuter Manfred : Regelungstechnik für Ingenieure. – 13.Auflage - Wiesbaden: Verlag Vieweg+Teubner , 2011, ISBN 978-3-8348-0900-1
- [AlGa2008] Aleksieva, Galabina : Förderverhalten von Mehrphasenpumpen mit variabler Spindelsteigung. – 1.Aufl. – Göttingen: Cuvillier Verlag, 2008, ISBN 978-3-86727-836-2
- [LePu2010] Leistritz Pumpen GmbH, Twin Screw Multiphase Pumps Rev. 2010, URL:  
<[http://www.leistritzcorp.com/pdf/twin\\_screw\\_multiphase\\_pumps\\_rev2010.pdf](http://www.leistritzcorp.com/pdf/twin_screw_multiphase_pumps_rev2010.pdf)>, verfügbar am 03.06.2012
- [LePu2011] Leistritz Pumpen GmbH, Leistritz Screw Pumps & Systems Rev. 2011, URL:  
<[http://www.leistritz.com/pumps/de/00\\_pdf/mpp\\_2011\\_neu.pdf](http://www.leistritz.com/pumps/de/00_pdf/mpp_2011_neu.pdf)>, verfügbar am 03.06.2012
- [Siem2012] Siemens AG ,SIMATIC Basissoftware für S7-300/400 PID Control Handbuch , C79000–G7000-C516-01
- [SiSp2012] Siemens AG , Bilder für Steuerungsaufbau wurden mit dem „SIMATIC Selection Tool“ V 8.0.7 erstellt
- [LePu2012] Leistritz Pumpen GmbH: " Baukasten Multiphasen Pumpsysteme für Dauerfrostzonen" Fachartikel in Deutsch in der Zeitschrift Pumpen und Kompressoren im April 2011, URL:  
<[http://www.leistritz.com/pumps/de/00\\_pdf/PUK\\_11\\_leistritz\\_dt.pdf](http://www.leistritz.com/pumps/de/00_pdf/PUK_11_leistritz_dt.pdf)>, verfügbar am 03.06.2012
- [SchHa2009] Schöner Hans Jürgen, W O R L D P U M P S September 2009, Multiphase help for gas reduction, URL:  
<<http://www.worldpumps.com/download/241>>, verfügbar am 03.06.2012

- [RNWi2012] RN-Wissen :URL: <<http://www.rn-wissen.de/index.php/Regelungstechnik#PID-Regler>>, verfügbar am 03.06.2012
- [LeiP2012] Leistritz Pumpen GmbH, Diagramme freigegeben zu Verwendung von Hr. Schöner 10.08.2012



# Anlagen

Komponentenliste SPS ..... I



# Anlage, Komponentenliste SPS

## Version 1

(je Pumpe einmal erforderlich)

Bestell-Nummer	Bezeichnung	Menge	Listenpreis	Gesamtpreis
6ES7315-2AH14-0AB0	Zentralbaugruppe CPU315-2 DP	1	1.350,00 €	1.350,00 €
6ES7321-1BL00-0AA0	Digitaleingabe 32DE, DC 24V potentialgetr.	2	294,00 €	588,00 €
6ES7322-1BL00-0AA0	Digitalausgabe 32DA, DC 24V, 0,5A potentialgetr.	1	407,00 €	407,00 €
6ES7331-7KF02-0AB0	Analogeingabe 8 AE 14 Bit 20ms pot.getr.	3	562,00 €	1.686,00 €
6ES7390-1AF30-0AA0	Profilschiene 530 mm	1	32,70 €	32,70 €
6ES7392-1AJ00-0AA0	Frontstecker 20-polig mit Schraubkontakten	3	21,40 €	64,20 €
6ES7392-1AM00-0AA0	Frontstecker 40-polig mit Schraubkontakten	3	33,70 €	101,10 €
6ES7953-8LL20-0AA0	Micro Memory Card 2 MByte	1	243,00 €	243,00 €
6GK7343-1CX10-0XE0	CP 343-1 Lean, Industrial Ethernet, S7-300	1	632,00 €	632,00 €
			<b>Summe</b>	<b>5.104,00 €</b>

## Version 2

(Peripherie für eine Pumpe, je Pumpenverbund einmal erforderlich)

Bestell-Nummer	Bezeichnung	Menge	Listenpreis	Gesamtpreis
6ES7317-2AK14-0AB0	Zentralbaugruppe CPU317-2 DP	1	2.965,00 €	2.965,00 €
6ES7321-1BL00-0AA0	Digitaleingabe 32DE, DC 24V potentialgetr.	2	294,00 €	588,00 €
6ES7322-1BL00-0AA0	Digitalausgabe 32DA, DC 24V, 0,5A potentialgetr.	1	407,00 €	407,00 €
6ES7331-7KF02-0AB0	Analogeingabe 8 AE 14 Bit 20ms pot.getr.	3	562,00 €	1.686,00 €
6ES7390-1AF30-0AA0	Profilschiene 530 mm	1	32,70 €	32,70 €
6ES7392-1AJ00-0AA0	Frontstecker 20-polig mit Schraubkontakten	3	21,40 €	64,20 €
6ES7392-1AM00-0AA0	Frontstecker 40-polig mit Schraubkontakten	3	33,70 €	101,10 €
6ES7953-8LL20-0AA0	Micro Memory Card 2 MByte	1	243,00 €	243,00 €
6GK7343-1CX10-0XE0	CP 343-1 Lean, Industrial Ethernet, S7-300	1	632,00 €	632,00 €
			<b>Summe</b>	<b>6.719,00 €</b>

## ET-200M

(für jede zusätzliche Pumpe einmal erforderlich)

Bestell-Nummer	Bezeichnung	Menge	Listenpreis	Gesamtpreis
6ES7153-1AA03-0XB0	IM 153-1 für ET200M PROFIBUS DP	1	241,00 €	241,00 €
6ES7321-1BL00-0AA0	Digitaleingabe 32DE, DC 24V potentialgetr.	2	294,00 €	588,00 €
6ES7322-1BL00-0AA0	Digitalausgabe 32DA, DC 24V, 0,5A potentialgetr.	1	407,00 €	407,00 €
6ES7331-7KF02-0AB0	Analogeingabe 8 AE 14 Bit 20ms pot.getr.	3	562,00 €	1.686,00 €
6ES7390-1AF30-0AA0	Profilschiene 530 mm	1	32,70 €	32,70 €
6ES7392-1AJ00-0AA0	Frontstecker 20-polig mit Schraubkontakten	3	21,40 €	64,20 €
6ES7392-1AM00-0AA0	Frontstecker 40-polig mit Schraubkontakten	3	33,70 €	101,10 €
			<b>Summe</b>	<b>3.120,00 €</b>

**Version 3**

( je Pumpenverbund einmal erforderlich)

Bestell-Nummer	Bezeichnung	Menge	Listenpreis	Gesamtpreis
6ES7400-1JA11-0AA0	UR2, Zentral-/Erweiterungsgerät 9 Steckpl.,K-Bus	1	541,00 €	541,00 €
6ES7405-0KA02-0AA0	Stromversorgung PS405 10A DC 24/48/60V	1	583,00 €	583,00 €
6ES7414-2XK05-0AB0	S7-CPU 414-2 2x0,5MB Arbeitssp. 1 MPI/DP, 1 DP	1	2.940,00 €	2.940,00 €
6GK7443-1EX20-0XE0	CP 443-1, Industrial Ethernet, S7-400	1	1.710,00 €	1.710,00 €
			<b>Summe</b>	<b>5.774,00 €</b>

**ET-200M**

(für jede Pumpe einmal erforderlich)

Bestell-Nummer	Bezeichnung	Menge	Listenpreis	Gesamtpreis
6ES7153-1AA03-0XB0	IM 153-1 für ET200M PROFIBUS DP	1	241,00 €	241,00 €
6ES7321-1BL00-0AA0	Digitaleingabe 32DE, DC 24V potentialgetr.	2	294,00 €	588,00 €
6ES7322-1BL00-0AA0	Digitalausgabe 32DA, DC 24V, 0,5A potentialgetr.	1	407,00 €	407,00 €
6ES7331-7KF02-0AB0	Analogeingabe 8 AE 14 Bit 20ms pot.getr.	3	562,00 €	1.686,00 €
6ES7390-1AF30-0AA0	Profilschiene 530 mm	1	32,70 €	32,70 €
6ES7392-1AJ00-0AA0	Frontstecker 20-polig mit Schraubkontakten	3	21,40 €	64,20 €
6ES7392-1AM00-0AA0	Frontstecker 40-polig mit Schraubkontakten	3	33,70 €	101,10 €
			<b>Summe</b>	<b>3.120,00 €</b>

Für die Kalkulation wurden die Listenpreise der Fa. Siemens verwendet.

# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ranshofen, den 23. August 2012

Horst Weißenbrunner